



# INSTRUMENTATION ULTRASONORE DES MILIEUX COMPLEXES : UNE APPROCHE NON LINÉAIRE POUR UNE CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE SUB-LAMBDA

dos Santos Serge

## ► To cite this version:

dos Santos Serge. INSTRUMENTATION ULTRASONORE DES MILIEUX COMPLEXES : UNE APPROCHE NON LINÉAIRE POUR UNE CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE SUB-LAMBDA. Mécanique [physics.med-ph]. Université François Rabelais - Tours, 2008. tel-00344955

**HAL Id: tel-00344955**

**<https://theses.hal.science/tel-00344955>**

Submitted on 11 Dec 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

DISCIPLINE : ÉLECTRONIQUE

Spécialité : Acoustique

Présentée et soutenue publiquement par :

**Serge DOS SANTOS**

le 14 novembre 2008

### INSTRUMENTATION ULTRASONORE DES MILIEUX COMPLEXES : UNE APPROCHE NON LINÉAIRE POUR UNE CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE SUB-LAMBDA

JURY :

PRÉSIDENT DU JURY :

Bernard CRETIN

Professeur à l'ENSMM, Besançon

RAPPORTEURS :

Christian CACHARD

Rachid EL GUERJOUMA

Jean-Louis IZBICKI

Professeur de l'Université Lyon 1, Lyon

Professeur de l'Université du Maine, Le Mans

Professeur de l'Université du Havre, Le Havre

EXAMINATEURS :

Marc LETHIECQ

Fabrice MÉRIAUDEAU

Guy MILLOT

Arnaud TOURIN

Professeur de l'Université François Rabelais, Tours

Professeur de l'Université de Bourgogne, Le Creusot

Professeur de l'Université de Bourgogne, Dijon

Maître de Conférences HDR à l'ESPCI, Paris

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches est disponible sur l'archive du CNRS à l'adresse suivante :

<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00344955/fr/>

ou sur le site du projet AERONEWS à l'adresse suivante :

<http://www.kuleuven-kortrijk.be/aeronews/HDR-SDS-mod.pdf>

*À Lauryne*  
*À Maëlys*





# Table des matières

<b>I Notice Individuelle</b>	<b>1</b>
<b>Curriculum Vitæ</b>	<b>3</b>
<b>Activités d'enseignement Universitaire</b>	<b>5</b>
1.1 Établissements d'exercice de l'activité d'enseignement . . . . .	5
1.2 Domaine de compétence de la formation dispensée . . . . .	5
1.3 Bilan pédagogique de la formation dispensée . . . . .	5
1.4 Descriptif détaillé des enseignements . . . . .	7
1.5 Encadrement de Projets et Stages Ingénieurs . . . . .	11
<b>Activités de Recherche Universitaire</b>	<b>17</b>
2.1 Équipes et Projets de Recherche développés . . . . .	17
2.1.1 Laboratoire Ultrasons Signaux et Instrumentation . . . . .	17
2.1.2 Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs . . . . .	20
2.1.3 Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne . . . . .	21
2.2 Liste des Contrats de Recherche . . . . .	22
2.3 Mobilité thématique et géographique dans des Universités Étrangères .	23
2.4 Animation et Diffusion Scientifique - Groupes de Recherche . . . . .	26
2.4.1 Accueil de Chercheurs d'une Équipe de Recherche Internationale	27
2.4.2 Chairman de Conférences . . . . .	27
2.5 Encadrement Doctoral et Master Recherche . . . . .	28
2.5.1 Stages de Master Recherche . . . . .	28
2.5.2 Thèses de Doctorat . . . . .	28
2.6 Activités d'Évaluation Scientifique et Technique - Comités de Relecture	29
2.6.1 Participation à des Jurys de Thèse . . . . .	29
2.6.2 Reviewer . . . . .	30
2.7 Relations avec le monde industriel . . . . .	30
<b>Activités de Responsabilités Administratives</b>	<b>33</b>
3.1 Responsabilités associées à l'enseignement . . . . .	33
3.2 Responsabilités associées aux activités de Recherche . . . . .	34
3.2.1 Responsabilités au sein du LUSI . . . . .	34
3.2.2 Comité d'organisation de manifestations . . . . .	35
3.2.3 Comité d'organisation scientifiques . . . . .	35
<b>Publications associées aux activités</b>	<b>35</b>

<b>II Synthèse de l'activité de Recherche</b>	<b>47</b>
<b>Introduction</b>	<b>51</b>
<b>1 Instrumentation ultrasonore pour l'acoustique non linéaire</b>	<b>53</b>
1.1 Introduction . . . . .	53
1.2 Stratégie scientifique . . . . .	54
1.2.1 Mise en place de la stratégie de recherche . . . . .	54
1.2.2 Évaluation de la potentialité de l'approche . . . . .	54
1.3 Thématique de recherche et objectifs . . . . .	55
1.3.1 Projet de recherche initial . . . . .	56
1.3.2 Une instrumentation ultrasonore spécifique . . . . .	57
1.4 Mesures globales par conversion de fréquences . . . . .	57
1.4.1 Premières expériences au LUSI . . . . .	57
1.4.2 Mesures globales par interactions d'ondes . . . . .	59
1.4.3 Méthode globale de modulation de phase . . . . .	60
1.4.4 Étalonage du transducteur BF en contact . . . . .	61
1.4.5 Limites de la méthode de modulation de phase . . . . .	64
1.5 Mesures locales par focalisation ultrasonore . . . . .	65
1.5.1 NL-TRA . . . . .	67
1.5.2 Méthodes locales NEWS-TR et TR-NEWS . . . . .	69
1.5.3 Bilan et perspectives . . . . .	75
1.6 Métrologie et étalonage des mesures non linéaires . . . . .	76
1.7 Conclusion et perspectives . . . . .	77
1.7.1 Automatisation et portabilité des systèmes de mesure . . . . .	77
1.7.2 Perspectives d'innovation technologiques . . . . .	78
1.7.3 Codage d'excitation - Complexification de l'excitation . . . . .	78
1.8 Approche systémique de l'instrumentation . . . . .	81
<b>2 Modélisation des systèmes acoustiques non linéaires</b>	<b>85</b>
2.1 Introduction . . . . .	85
2.2 Propriétés générales des systèmes non linéaires . . . . .	86
2.2.1 Linéarité et stationnarité d'un système . . . . .	86
2.2.2 Définition de la représentation d'un système . . . . .	87
2.2.3 Interprétation en terme d'invariant du système linéaire . . . . .	88
2.3 Signatures non linéaires . . . . .	89
2.4 Vers une représentation des systèmes non linéaires . . . . .	90
2.5 Équations de l'acoustique non linéaire . . . . .	93
2.5.1 Conditions <i>a priori</i> d'analyse . . . . .	95
2.5.2 Conditions <i>a priori</i> d'excitation . . . . .	99
2.5.3 Conséquences en acoustique non linéaire . . . . .	103
2.6 Simulations de la propagation non linéaire . . . . .	104
2.6.1 Stratégie du maintien de l'approche temporelle . . . . .	105
2.6.2 Simulations numériques TR-NEWS et NEWS-TR . . . . .	105

<b>3</b>	<b>Mise en place d'une analyse systématique</b>	<b>111</b>
3.1	Introduction . . . . .	111
3.2	Symétries des systèmes et groupes de Lie . . . . .	112
3.2.1	Symétrie d'une équation différentielle . . . . .	113
3.2.2	Ensemble complet des invariants d'un groupe de symétrie . . . . .	115
3.3	Symétries sur les conditions <i>a priori</i> d'analyse . . . . .	115
3.3.1	Symétrie de l'équation des ondes sphériques . . . . .	116
3.3.2	Symétrie de l'équation de diffusion . . . . .	117
3.3.3	Symétries des équations de l'acoustique non linéaire . . . . .	118
3.4	Symétries sur les conditions <i>a priori</i> d'excitation . . . . .	121
3.4.1	Symétries de la méthode d'inversion d'impulsion . . . . .	122
3.4.2	Généralisation de la symétrisation de l'excitation . . . . .	122
3.4.3	Symétrie par renversement temporel . . . . .	125
3.4.4	Symétrie par réciprocité . . . . .	126
3.5	Systémique en acoustique non linéaire ultrasonore . . . . .	127
3.5.1	Modélisation multi-échelles des milieux complexes . . . . .	127
3.5.2	Traitement du signal multi-échelles . . . . .	131
3.5.3	Mélanges des échelles et ordres de grandeurs . . . . .	132
3.5.4	Mélanges des échelles de temps courts et temps long . . . . .	133
3.5.5	Mélanges des phénomènes physiques . . . . .	134
<b>4</b>	<b>Avancées dans l'objectif et projet de recherche</b>	<b>137</b>
4.1	L'enjeu de l'imagerie ultrasonore . . . . .	139
4.2	Contexte du CND . . . . .	139
4.2.1	Enjeu des matériaux composites . . . . .	139
4.2.2	Physique complexe : contact, collage, adhésion . . . . .	140
4.3	Contexte des applications médicales . . . . .	141
4.3.1	Instabilité modulationnelle des agents de contraste . . . . .	141
4.3.2	Imagerie TR-NEWS de la dent humaine . . . . .	141
	<b>Annexes</b>	<b>144</b>
	<b>Index</b>	<b>160</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>162</b>



## **Première partie**

### **Notice Individuelle**



# Curriculum Vitæ



Nom patronymique : **DOS SANTOS**  
 Prénom : **Serge**  
 Date et lieu de naissance : 18 février 1971 à Valenciennes (Nord)  
 Nationalité : Française  
 Situation familiale : Divorcé, 2 filles (nées en 2000 et 2002)  
 Adresse personnelle : 18A Rue Guillaume Ribier, 41000 BLOIS  
 Téléphone personnel : 06 66 55 68 14  
 Situation professionnelle : Maître de Conférences à l'ENI Val de Loire  
 Adresse professionnelle : ENI Val de Loire, Rue de la Chocolaterie,  
 BP3410, 41034 BLOIS CEDEX  
 Tel/Fax : +33 2 54 55 84 27/ +33 2 54 55 84 45  
 Courriels : serge.dossantos@univ-tours.fr , serge.dossantos@ieee.org

---



---

2006-2008	<b>Maître de Conférences</b> 61ème Section Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal à l'ENI Val de Loire (ENIVL) à Blois <b>Activités de Recherche</b> effectuée au sein de l'Unité Mixte de Recherche U930 INSERM-CNRS-Université de Tours, équipe " Caractérisation Ultrasonore et Piézoélectricité "
1999-2006	<b>Maître de Conférences</b> 61ème Section Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal à l'Université François Rabelais de Tours ( <b>Qualifications CNU en 1999 : 61-63-28</b> ) <b>Activités d'enseignement</b> à l'Ecole d'Ingénieurs du Val de Loire (EIVL) à Blois <b>Activités de Recherche</b> effectuée au sein du Laboratoire Ultrasons Signaux et Instrumentation (LUSSI-FRE 2448 CNRS) et du GIP Ultrasons à Blois
2005-2006	<b>Congé pour Recherche et Conversion Thématique</b> (6 mois) attribué sur le Contingent du CNU 61ème section effectué en collaboration avec Artann Labs (New Jersey, USA). Séjours invités de 6 semaines (juin 2005) et 2 semaines (novembre 2005)
1998-1999	<b>ATER</b> à EIVL-Activité de Recherche au LUSI
1995-1998	<b>Doctorant</b> au Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs (LPMO) du CNRS (UPR 3203) associé à l'Université de Franche-Comté
1994-1995	<b>Stagiaire</b> de DEA au Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne, équipe "Ondes et Structures Cohérentes"

---



---



## Formation Universitaire

Doctorat	<p>Spécialité <b>Sciences pour l'Ingénieur</b>, intitulé " <b>Étude non linéaire et arithmétique de la synchronisation des systèmes : application aux fluctuations de basse fréquence des oscillateurs ultra-stables</b> ", effectué au Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs (LPMO) du CNRS (UPR 3203) associé à l'UFR Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, et soutenu le 30 novembre 1998 à Besançon - Mention Très Honorable avec les Félicitations du Jury</p> <p><b>Jury</b> : rapporteurs : M. C. AUDOIN, Directeur de Recherche CNRS au Laboratoire de l'Horloge Atomique (Orsay) et M. G. KAMARINOS, Directeur de Recherche CNRS au Laboratoire de Physique des Composants à Semiconducteurs (Grenoble) ; examinateurs : Mme E. BAYER-FLUCKIGER, Directeur de Recherche CNRS (Université de Franche-Comté), M. R. J. BESSON, Professeur à l'ENSMM, directeur du Laboratoire de Chronométrie Électronique Piézoélectricité (Besançon), M. D. HAUDEN, Professeur à l'ENSMM, directeur du LPMO-CNRS (Besançon), M. M. REMOISSENET, Professeur Émérite de L'Université de Bourgogne (Dijon) ; directeur de thèse : M. M. PLANAT, Habilité à Diriger des Recherches, Chargé de Recherche CNRS au LPMO-CNRS</p>
Master (M2)	<p><b>Diplôme d'Étude Approfondie de Physique</b> Interaction Matière et Rayonnement, option "Physique moléculaire et non linéaire" à l'Université de Bourgogne - Mention Assez Bien - Juin 1995</p> <p>Intitulé " <b>Instabilité modulationnelle dans les systèmes discrets non linéaires de dimension finie</b> ", Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne (Dijon) sous la direction des Professeurs J.-M. Bilbault et E. Coquet.</p>
Maîtrise (M1)	<p><b>Maîtrise de Physique</b> à l'Université de Bourgogne - Juin 1994 - Mention Assez Bien</p>

## Autres Formations

Méthodes d'Évaluation Non Destructive pour le Génie Civil, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes le 8 octobre 1999

Stages de formation C et C++ au CIRIL à Nancy (1998)

Stages en anglais dans le cadre de la formation permanente du CNRS (1997 et 1998)

---

# Activités d'enseignement Universitaire

## 1.1 Établissements d'exercice de l'activité d'enseignement

- ENI Val de Loire : 2006-2008 - Directeur : R. Boné
- ENSIETA : 2006-2008 - Resp. d'option : Sylvain Moyne
- Prague Technical University (ERASMUS) : 2007-2008 - Resp. Václav Kùs
- Université de Tours, EIVL : 1998-2006 - Directeur : J. Le Meur
- Université de Franche-Comté (IUT GMP, Besançon) : 1997-1998 - Resp. : J.-P. Chevaux
- Université de Bourgogne (Faculté des Sciences) : 1994-1995 - Resp. J.-P. Dufour

## 1.2 Domaine de compétence de la formation dispensée

Le profil généraliste de la formation Ingénieur de l'EIVL (puis ENI Val de Loire à partir de 2006) m'a permis d'aborder :

- des disciplines fondamentales relevant de la physique de base (EIVL - cycle préparatoire) jusqu'à la physique avancée (Physique des Systèmes Non Linéaires)
- des disciplines des Sciences pour l'Ingénieur relevant du domaine de l'EEA (Électronique, Automatique et Traitement du Signal)
- disciplines liées aux activités de Recherche (Acoustique Ultrasonore et Systèmes Électroniques d'Instrumentation)

## 1.3 Bilan pédagogique de la formation dispensée

- **VHE (volume horaire étudiant) moyen** : 246h/an.
- **responsabilité des enseignements** : Traitement du Signal, Automatique Non Linéaire, Bruit et Conditionnement de Signaux, Systèmes Non Linéaires et Acoustique Automobile
- mise en place de nouveaux d'enseignements : BCS avec Francesco Colamartino, Traitement du Signal (TD-TP) avec Pascal Tran, Automatique Non Linéaire (TD-

TP) avec Mickaël Lematre, Systèmes Asservis (TP) avec Jean-Paul Chemla

Année	Intitulé	Cours (Eq TD)	TD	TP (Eq TD)
2005-2006 (CRCT <sup>1</sup> 6 mois)	Traitement du Signal	21	28	21
	Automatique Non Linéaire	15	16	
2004-2005	Electronique Numérique		20	21
	Traitement du Signal	21	28	21
	Automatique Non Linéaire	15	16	
	Systèmes Non Linéaires	30		
	Systèmes Asservis		16	8
	Systèmes Electroniques d'Instrumentation (MASTER ESM)	18		
2003-2004	Electronique Numérique		20	11
	Traitement du Signal	21	28	32
	Bruit et Conditionnement de signaux	18		
	Automatique Non Linéaire	15	16	
	Systèmes Non Linéaires	30		
	Systèmes Asservis		16	8
	Physique		46	
2002-2003	Physique		86	32
	Traitement du Signal	21	28	21
	Bruit et Conditionnement de signaux	18		
2001-2002	Physique		92	80
	Traitement du signal	21	28	21
	Bruit et Conditionnement de signaux	18		
2000-2001	Physique		116	40
	Automatique		8	22
	Traitement du signal	21	14	11
	Bruit et Conditionnement de signaux	18		
	Cours Option EIVL SDF	12		
1999-2000	Physique		120	80
	Automatique		8	18
	Traitement du Signal	9	14	11
1998-1999 (ATER 61-63)	Physique et Electronique		88	104
1995-1998 (Vacataire)	Physique et Electronique			70
TOTAL (1816 h)		342	852	622

Tab 1 – Bilan horaire (période 1995-2006) de l'activité d'enseignement Universitaire (Université de Bourgogne, IUT de Besançon, Université de Tours-EIVL). <sup>1</sup> : Congé pour Recherche et Conversion Thématique

La répartition cours-TD-TP est présentée dans le tableau 1 pour l'affectation à l'EIVL, et le tableau 2 pour l'affectation à l'ENIVL.

Année	Intitulé	Cours (Eq TD)	TD	TP (Eq TD)
2007-2008 (ENI Val de Loire)	CND Acoustique Non Linéaire (M2)	2		
	Traitement du Signal (M1)	21	28	21
	Automatique Non Linéaire (M1)	15	16	6
	Systèmes Asservis (L3)		16	8
	Systèmes Electroniques d'Instrumentation (M2 MASTER ESM)	18		
	Traitement du Signal Déterministe (L3)	21	28	21
2007-2008 (ENSIETA Brest)	Architecture Automobile : Acous- tique Automobile; aspects théo- riques (M2)	18		
2007-2008 ( <a href="#">www</a> ) (Prague Technical University) 6 nov 2007	Complexity of Material Explored with Nonlinear Tools : from Physical Concepts to Image Processing (M2)	6		
2006-2007 (ENI Val de Loire)	CND Acoustique Non Linéaire (M2)	2		
	Traitement du Signal (M1)	21	28	21
	Automatique Non Linéaire (M1)	15	16	6
	Systèmes Asservis (L3)		16	8
	Systèmes Electroniques d'Instrumentation (M2 MASTER ESM)	18		
	Electronique Numérique (L3)		20	11
2006-2007 (ENSIETA Brest)	Architecture Automobile : Acous- tique Automobile; aspects théo- riques (M2)	18		
TOTAL (445 h)		175	168	102

Tab 2 – Bilan horaire (période 2006-2008) de l'activité d'enseignement Universitaire à l'ENIVL et à l'ENSIETA

## 1.4 Descriptif détaillé des enseignements

Période 2007-2008

### Lecture ERASMUS Master Prague Technical University (M2)

Cours : *Complexity of Material Explored with Nonlinear Tools : from Physical Concepts to Image Processing*

- Acoustic properties of homogeneous medium (liquids, gazes and solids) - Complexity of heterogeneous and damaged materials - General acoustics and wave propagation - Introduction to Nonlinear Systems - History and simple experiments - Concepts and generic physical behaviours - Nonlinear dynamics, analysis and signal processing - Engineering applications and future trends related to structural health monitoring of aeronautical structure

*Période 2006-2008*

**Cours d'Option Architecture Automobile 3ème année ENSIETA (M2)**

Cours : *Acoustique Automobile : aspects théoriques* :

- Introduction à l'acoustique physique - Matériaux - milieu de propagation
- Acoustique physique théorique - Equation de Propagation - " Hypothèse acoustique " - Effets géométriques des sources et des milieux de propagation - Propagation acoustique hors de l' " hypothèse acoustique " - Puissance acoustique - Directivité - Sources - Rayonnement

*Période 2004-2008*

**Cours de Master ESM (Electronique Signal et Microsystèmes) - M2 -Tronc Commun**

Cours : Systèmes Électroniques d'Instrumentation ; Module : Bruit électronique

- Théorie du bruit blanc - Application au bruit Johnson dans les résistances - Distribution de Poisson - Mouvement Brownien - Bruit de marche Aléatoire - processus Poissoniens - Bruit flicker ou bruit en  $1/f$  - transformation du bruit, applications à la caractérisation de systèmes - Rapport Signal sur Bruit - Noise Figure - Facteur de bruit - applications pratiques avec mesure du facteur de bruit d'un amplificateur et d'un transistor, simulation de bruits sous Labview et Matlab

*Période 1998-2008*

**Cours d'Option SAI (Systèmes Automatisés et Instrumentation) 5ème année EIVL (Cycle Ingénieur, M2)**

Cours : *Bruit et conditionnement des signaux*

- Théorie du bruit blanc - Application au bruit Johnson dans les résistances - Distribution de Poisson - Mouvement Brownien - Bruit de marche Aléatoire - processus Poissoniens - Bruit flicker ou bruit en  $1/f$  - transformation du bruit, applications à la caractérisation de systèmes - Rapport Signal sur Bruit - Noise Figure - Facteur de bruit - applications pratiques avec mesure du facteur de bruit d'un amplificateur et d'un transistor, simulation de bruits sous Labview et Matlab

Cours : *Systèmes Non linéaires*

- Expériences, présentation générale, bibliographie et état de l'art, le pendule double, l'oscillateur chaotique, la propagation acoustique non linéaire dans l'eau
- Présentation de systèmes non linéaires "académiques" - Propriétés intrinsèques d'un système non linéaire - Conséquences de la nonlinéarité (harmoniques, intermodulation, synchronisation, systèmes lentement variables, etc.) - Composants non linéaires (diodes, varistances, varicap, inductances commandées, amplificateur opérationnel réel) et de circuits non linéaires (Trigger de Schmitt, oscillateur à relaxation)-Modélisation paramétrique - stabilité - bifurcation - hystérésis -
- Optique Non Linéaire - Susceptibilité Non Linéaire - Effets Electrooptiques - Polarisation Non Linéaire - Interactions Optiques Non Linéaires - Conjugaison de Phase -Holographie

- Acoustique Non Linéaire et Applications en Contrôle Non Destructif des matériaux et des milieux biologiques : Spectroscopie Acoustique par Résonance Impulsionnelle, Spectroscopie Non Linéaire de Modulation - Méthodes d'amplitudes finies
- Modélisation non linéaire (Espace des phases- Quelques comportements non linéaires. Observations de systèmes fortement non linéaires (ondes de choc, solitons, etc.)
- Applications industrielles des effets non linéaires

### **Cours d'Option SDF (Sûreté de Fonctionnement) 5ème année EIVL ( 3ème Cycle Ingénieur)**

Cours : Filtrage de Signaux - Cepstre et application à l'étude de la fiabilité des machines tournantes

### **Traitement du Signal 4ème année EIVL (Cycle Ingénieur)**

Cours : *Signaux déterministes et Signaux Aléatoires*

- Théorie des distributions - Transformations de Laplace et Fourier des distributions - Propriétés énergétiques et spectrales des signaux - Échantillonnage - Signaux numériques - Les systèmes linéaires - Filtres - Rappels de Probabilités et Statistiques, Stationnarité - Ergodisme - Corrélation - Bruit blanc, bruit en  $1/f$  - Densité Spectrale de Puissance - Théorème de Wiener-Kinchine - Rapport Signal sur Bruit - Exemples de signaux aléatoires (NRZ) et pseudo-aléatoires - Détection et estimation des signaux - Méthodes avancées du Traitement du Signal (Ondelettes)

Travaux Dirigés

- Transformation de Fourier - Spectres de signaux déterministes et aléatoires - Échantillonnage et FFT - Calcul de Rapport Signal sur Bruit

Travaux Pratiques

- Unités - Mesures de spectres de signaux déterministes et aléatoires - Échantillonnage - Aliasing temporel - Repliement de spectre - Programmation sur DSP TMS320C50

### **Automatique Non Linéaire 4ème année EIVL (Cycle Ingénieur)**

Cours : *Automatique Avancée*

- Présentation de nonlinéarité simples (courbure, seuil, saturation, jeu sans inertie d'aval,...) étudiées grâce à la méthode du premier harmonique - définition de leurs gains complexes équivalent - Rappel de la méthode du plan de Phase et modélisation sous Matlab. Introduction à la méthode de Lyapounov - Présentation et introduction à quelques systèmes plats (robot manipulateur, train pendulaire)

Travaux Dirigés

- méthode du plan de Phase - méthode du premier harmonique

Travaux Pratiques

- Simulations numériques Matlab de la méthode du Plan de Phase

### **Automatique et Systèmes Asservis 3ème année EIVL (Cycle Ingénieur) Responsable du cours : Marc Lethiecq**

Travaux Dirigés

- Réponse temporelle et fréquentielle des systèmes linéaires- Transformation de Laplace - Représentations de Bode, Black Lieu d'Evans - Lieu de Nyquist

### Travaux Pratiques

- Asservissement de position (maquette pratique et simulation sous ACSYDE)
- Simulation sous Matlab (Simulink) - Réponse temporelle et fréquentielle d'un circuit électronique

**Électronique Numérique 3ème année EIVL (Cycle Ingénieur)** Responsable du cours : Pascal Tran

### Travaux Dirigés

- Combinatoire : Algèbre de Boole, Méthode de Karnaugh, Codeurs, Afficheurs 7 segments, Séquentiel : Chronogrammes, Bascules, Compteurs - CAN - CNA

### Travaux Pratiques

- Programmation sur Circuits Logiques Programmables (ISPLSI 1016 LATTICE Semiconducteurs) Logiciel SYNARIO -Analyse - Schémas - Conversion ABEL-JEDEC

**Physique 1ère année EIVL (Cycle préparatoire)** Responsables du cours : Frédéric Mabilat, Xavier Pocheveux, René Agostini

### Travaux Dirigés

- Électrocinétique - Électronique - Électrostatique Optique géométrique Thermodynamique - Calorimétrie Mécanique du point - Statique des solides et des fluides

### Travaux Pratiques

- Incertitudes de Mesures - Vérification des théorèmes généraux de l'électricité (Millman, Thévenin) L'amplificateur opérationnel et ses défauts - Mesures d'impédance électrique - Filtres électroniques - Optique géométrique - Simulation du microscope, de l'appareil photographique et de l'IJil détermination de distances focales de lentilles par les méthodes de Bessel et de Silbermann - Déviation dans le prisme - Oscillations mécaniques - Décomposition de mouvement en modes propres

*Période 1995-1998*

**Responsable de TP d'électricité et électrotechnique (1ère année) à l'IUT Génie Mécanique et Productique (GMP) de Besançon :**

- Moteurs pas à pas - Machines à courant continu et alternatif - Transformateurs. Résonance - Courant Alternatif

**Assistant à l'encadrement des TP de Maîtrise de Physique à l'Université de Bourgogne**

- Effet Hall, pompage optique, module d'Young, compteur à scintillation, pulso-  
graphe, hyperfréquence, RMN

**Encadrement TP de Licence de Physique et Applications à l'Université de Bourgogne**

- résonance, fibres optiques, effet Kerr, effet Zeeman, eutexie, techniques du vide, rayons X.



## 1.5 Encadrement de Projets et Stages Ingénieurs

L'activité d'encadrement des élèves ingénieurs de l'ENIVL constitue une part importante de la mission d'enseignement en École d'Ingénieurs. Sur la période 1999-2008, elle est évaluée à un VHE (Volume Horaire Étudiant) de 50hTD/an

### Bilan des encadrements (Période 1999-2008)

Encadrement des projets de fin d'étude (PFE M2) : 33

Année	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008
Encadrements (taux)	1 (100%)	3 (100%)	2 (100%)	6 (100%)	6 (100%)	7 (50%)	3 (50%)	4 (50%)	1 (100%)

Encadrement des projets industriels et techniques - Autres stages : 48

	Projets d'option (M2)	Projet industriels (M1)	Projets techniques et bibliographiques (L3)	Autres stagiaires
Année 1999-2008	8 (100%)	11 (50%)	27 (100%)	2 (100%)
Eq TD	80	110	54	20

### Stages Ingénieurs de fin d'études (PFE M2) (ENIVL 5ème année)

L'encadrement des stagiaires en PFE permet de toucher au plus près des problématiques des industriels. Les stages ont donc été souvent associés aux domaines relevant des activités de recherche : aéronautique (10), industrie automobile (7), R&D (5)

Année 2007-2008

✓ "SHADOCK : SHARing DOcument and Knowledge Tool", Xavier MARCHEGAY, EADS ASTRIUM, TOULOUSE

Année 2006-2007

✓ "Instrumentation of a plasma immersion ion implantation machine", Julien DORVAL, IBS, GREASQUE

✓ "Implementation of a magnetometer inside an integrated electrical standby instrument", Sébastien HERRAULT, THALES AVIONICS, VENDOME

✓ "Détection Ultrasonore de micro-bulles par filtrage non linéaire et codage de sources", ROBIN Guillaume, GIP ULTRASONS, TOURS



- ✓ "Conception et réalisation d'une méthode de localisation hyperbolique pour un système d'intercepteurs VUHF", Julien WEHRUNG, THALES COMMUNICATION, EWR, CHOLET

Année 2005-2006

- ✓ "Evaluation des paramètres optimums pour la réparation de pixels LEP (Light Emitting Polymer) défectueux à l'aide d'un laser", GUY Julien, CAMBRIDGE DISPLAY TECHNOLOGY (UK)
- ✓ "Color Alignment System Analysis", BORDIER Sylvain, THALES TRAINING & SIMULATION LTD CRAWLEY (UK)
- ✓ "Optimisation des conditions d'émission/réception de transducteurs ultrasonores à couplage par air", MITAULT Romuald, DASSAULT AVIATION, ARGENTEUIL

Année 2004-2005

- ✓ "Cellules d'assemblage automatisées", VERLEZ Eric, DASSAULT AVIATION, Biarritz
- ✓ "Développement et mise en place d'un banc de test pour sirènes d'alarme", PELISSET Nolween, ALLIANSYS, HONFLEUR
- ✓ "Analyse et Amélioration de l'incertitude des bancs de mesures des échangeurs eau-huile", PATIER Damien, FILTRAUTO, VIRE
- ✓ "Conception/modélisation de transducteur bi-fréquence pour la caractérisation non linéaire des matériaux", GASSAMA Ba Seckou, LUSSI FRE 2448-CNRS, Blois
- ✓ "Modélisation sous Matlab/Simulink d'un module électronique de porte de voiture", KONIECKI Caroline, MAGNETI MARELLI, CHATELLERAULT
- ✓ "Ostéodensitométrie ultrasonore par mesure du paramètre non-linéaire B/A : mise en place expérimentale et test sur des os ex-vivo", SENEGOND Nicolas, Hôpital Bretonneau, Tours
- ✓ "Détermination des fréquences de résonance des calculs rénaux et fragmentation par excitation appropriée", GUERIN Thomas, INSERM, LYON

Année 2003-2004

- ✓ "Maîtrise de variabilité sur des cartes électroniques montées sur des équipements aéronautiques", Stéphane MICHAUD, Thales Avionics à Valence
- ✓ "Mise en place d'un test en fin d'assemblage pour détection de fuites moteur. Gestion de Production Informatique", WEITZ Cédric, S.M.A (Société de Motorisations Aéronautiques) BOURGES
- ✓ "Validation de la mesure du zéro des capsules altis", LATRE Laurent, THALES AVIONICS VENDOME
- ✓ "Evaluation de Fonctions Evoluées des Réseaux Multi-Eléments Ultrasonores pour le CND Aéronautique de Production", GOBE Josselin, EADS FRANCE SURESNES
- ✓ "Expertise et tests de vibrations des terminaux ALCATEL", CHAN AH LAI Jimmy, FLEXTRONICS LAVAL
- ✓ "Expertise et optimisation des principales technologies d'instrumentation des moteurs de développement", GENOT Yoan, SNECMA MOTEURS MOISSY CRAMAYEL

Année 2002-2003

- ✓ "Mise en place d'un système automatisé sous OI-PRO", FAURE Pierre-Emmanuel, Peugeot Citroen Automobiles SA, Montbéliard
- ✓ "Bancs d'Essais Développés sous Langages Graphiques", BONNET Frédéric, MD Electronic, BOUGUENAI
- ✓ "Développement d'un Système de Pesée sur une Presse Enrubanneuse", PESSARD Mickaël, JOHN DEERE, Gray

- ✓ *"Développement Logiciel pour l'UMTS"*, SUBASING Harini, ALCATEL CIT, Velizy
- ✓ *"Test et validation du système d'acquisition numérique pour les 1280 voies analogiques d'un Bêta-Imager"*, GOURSSIES Matthieu, SUBATECH CNRS, Nantes
- ✓ *"Adaptation Hardware et Software de Signaux Sinusoïdaux en Sortie de Capteurs Incrémentaux"*, RUAUX Claire, ETAMIC S.A., Bagneux

Année 2001-2002

- ✓ *"Conception d'un banc d'endurance et modification d'un poste de contrôle de chauffe"*, Frédéric Viala, Robert BOSCH, Rodez
- ✓ *"Optimisation des performances des lignes de conditionnement blisters"*, Aniss Chefaier, Pfizer Manufacturing, Amboise

Année 2000-2001

- ✓ *"Commande d'un actionneur en fonction de données véhicule"*, Jérôme Tiphène, DRIA, Peugeot Citroën SA, Velizy (actuellement en CDI au sein du groupe)
- ✓ *"Incertitudes et Moyens de Mesure au Laboratoire d'Essai"*, Joao Pasqualin (Elève Brésilien), Faurecia, Flers
- ✓ *"Conception d'un Logiciel d'Exploitation et d'Analyse pour Machine de Thermocollage"*, Nicolas Foucal, Thales Microsonics

Année 1999-2000

- ✓ *"Détection d'obstacles appliquée à la précollision - Modélisation et étude expérimentale d'un capteur"*, P. Barraud, DRIA, Peugeot Citroën SA, Velizy

## Projet d'Option SAI (ENIVL 5ème année)

Année 2007-2008

- ✓ *"Propagation ultrasonore dans une structure aéronautique complexe : étalonnage de la réponse non linéaire à une excitation de type sweep de fréquence"*, M CHAMPOD<sup>1</sup>

Année 2006-2007

- ✓ *"Programmation sous Matlab et évaluation de techniques de traitement du signal applicables au CND ultrasonique à couplage par air"*, R. MITAULT

Année 2005-2006

- ✓ *"Réalisation d'une instrumentation virtuelle pour le pilotage d'un réseau de générateurs"*, J. KROLEVITZ, G. REIX<sup>1</sup>

Année 2003-2004

- ✓ *"Asservissement de moteur à courant continu par DSP TMS320C50"*, T. GUILLOUCHE
- ✓ *"Amélioration d'un programme sous LabVIEW pour l'automatisation d'un système de focalisation temporelle et spatiale"*, S. RICHARD, J. CHAN<sup>1</sup>

Année 2002-2003

- ✓ *"Mise en place d'un banc de caractérisation et d'une interface de mesure de la turbulence"*, F. BONNET, M. GOURSSIES
- ✓ *"Etude et Calibration d'une sonde laser interférométrique : mise en place de l'automatisation de l'instrumentation"*, T. VIRALDE, J. BONNET<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Ces projets réalisés par des élèves ingénieurs ENIVL ont permis d'améliorer l'instrumentation Labview des méthodes expérimentales de focalisation ultrasonore par retournement temporel non linéaire

Année 2001-2002

- ✓ *"Détection de piétons par capteurs Pyroélectriques"*, J. TIPHENE, G. GAUDILLIERE

## Projets Industriels (ENIVL 4ème année)

Année 2007-2008

- ✓ *"Optimisation du matériau de la jambe du train d'atterrissage du Festival R40S Sport"*, B. COURTY, M. GUFFROY, P.-A. JACQUES DIT ROUTIER, en collaboration avec la société AEROSTAR et L'Université Polytechnique de Bucarest (Roumanie)
- ✓ *"Diminution des nuisances sonores d'une machine en cours de fonctionnement"*, G. CHOLLET, V. GOUBIN en collaboration avec la société JTEKT HPI (41)

Année 2006-2007

- ✓ *"Conception d'un mélangeur à caoutchouc"*, K. AUDUBERT, G. BLUTEAU, en collaboration avec la société Lescuyer Villeneuve (41)
- ✓ *"Conception d'un contrôleur d'éclairage animé"*, D. GERTHOFFERT, L. SLIMANI, en collaboration avec la société TRAFF Lighting Solutions (41)

Année 2005-2006

- ✓ *"Analyse d'artéfacts pour la détection d'embolies cérébraux par la mesure de déplacements avec un accéléromètre"*, K. MARCKERT, G. HUISER, en collaboration avec le GIP Ultrasons (37)
- ✓ *"Etude du départ en flottement d'une structure aéronautique par la méthode polyréférence"*, C. GAUTHIER, H. RAMANANKATSOINA, en collaboration Dassault Aviation (92)

Année 2004-2005

- ✓ *"Validation d'une Méthode Non Destructive pour le Contrôle de Pignons Cémentés"*, L. DE PINHO, J. KELLER, en collaboration avec la société Hispano-Suiza (92)

Année 2001-2002

- ✓ *"Instrumentation de tests Pré-crash"*, F. JEAN, T. HUISJER en collaboration avec la société Peugeot-Citroën SA (78)
- ✓ *"Mise en place d'un banc de caractérisation de transducteurs air"*, A. COLOMB, J. PERCEVAULT, en collaboration avec la société Dassault-Aviation.

Année 1999-2000

- ✓ *"Etude de l'enfoncement des blocs avants lors de chocs de véhicules"*, G. GOBIN, N. FOUCAL en collaboration avec la société Peugeot-Citroën SA (78)

Année 1998-1999

- ✓ *"Mise en œuvre d'un système de suivi de la trajectoire du soleil pour l'optimisation d'un four solaire"*, en collaboration avec la société Aliotis (41)

## Projets Techniques (ENIVL 3ème année)

Année 2007-2008

- ✓ *"Découverte du domaine des polymères"*, London Metropolitan University, E. Bonin

- ✓ "Technicien dans le laboratoire de polymères de l'Université de London Metropolitan University", G. Doyen

Année 2006-2007

- ✓ "Etude du passage à niveau : mise en place de la synthèse logique", Gaudin et Nguyen

- ✓ "Cryptage et Sécurité de l'information à travers le circuit de Chua", Masson et Sami

Année 2002-2003

- ✓ "Etude du défauts de raccordement entre deux fibres optiques", Camus et Cardon

- ✓ "Mise en place de capteurs électromagnétiques pour la mesure des oscillations d'un pendule double", Merrien et Le Doussal

- ✓ "Programmation LABVIEW pour l'extraction d'un signal dans le bruit", Plancq et Magona

- ✓ "Analyse spectrale et temporelle de données économiques : mise en place d'un programme de calcul et applications", Marcal et Tilly

Année 2001-2002

- ✓ "Interface d'un oscilloscope sous un plate-forme Linux", J. Estarit et J. Gobé

- ✓ "Création d'un système de détection à l'aide d'un capteur pyroélectrique", S. Richard et K. Sokou

## Projets techniques associés à une "International Summer Institute on Systems Engineering" (ENIVL 3ème année)

Année 2007-2008

- ✓ **Stevens Institute of Technology** , USA (juin 2008) : BELAABED Yassine, DOBOL Sébastien, FERJANI Mehdi, LARRIEU Julien, MINARD Benoit, SUTTER Aurélien, YAACOUBI Ilyasse

## Projets de Recherche Bibliographique (EIVL 3ème année)

Année 2006-2007

- ✓ "La technologie Bluetooth dans l'industrie", Y. Lehjé et A. Lyhyaoui

Année 2005-2006

- ✓ "Évolution du pilotage des lanceurs Ariane", M. Rosetzky et V. Schmidt

Année 2004-2005

- ✓ "Le Microscope à Force Atomique et ses Applications Médicales", V. Pastureau et G. Robin

Année 2001-2002

- ✓ "Le soliton et son application à la transmission d'information par fibre optique", F. Ragot et S. Delion

- ✓ "Les applications de l'effet électro-optique", O. Douillet et E. Gardin

- ✓ "Les méthodes cryptographiques au cours des dix dernières années", E. Galicher et C. Luspín

- ✓ "La télédétection", O. Douillet et E. Gardin

- ✓ "Systèmes embarqués dans l'automobile et l'aéronautique", Y. Lassoued et S. Thiebaud

- ✓ *"Caractérisation de la corrosion dans les alliages d'aluminium. Méthodes d'essais non destructifs appliquées à l'apparition et au dimensionnement de la corrosion"*, J-L Calvet et J. Debout

Année 2000-2001

- ✓ *"Linux dans les Entreprises"*, E. Malot et Y. Merrien
- ✓ *"Les Entreprises Européennes Nouvellement Implantées à Curitiba"*, M. Gourssies et F. Ducret
- ✓ *"Principes et Méthodes des Contrôles d'Etats de Surface"*, A. Dycke et V. Judalet
- ✓ *"Reconnaissance de Formes et Reconnaissance Vocale"*, C. Riverain
- ✓ *"Détection des défauts par des Méthodes Ultrasonores"*, S. Chauvin et D. Tannoury

Année 1998-2000

- ✓ *"Thermographie Infrarouge"*, P.E. Dautry et Y. Baux
- ✓ *"Sécurité et Fiabilité des Systèmes de Télécommunication"*, Julien Mérienne

## Autres Stagiaires (IUT et BTS)

Année 2007-2008

- ✓ *"Simulation de la propagation optique et/ou acoustique dans une cavité : analyse des rayons réfléchis en fonction de la géométrie"*, A. LEMAIRE, Étudiant en 1ère année de BTS Génie Optique, Lycée Vaucanson, Tours, en stage au LUSI

Année 1999-2000

- ✓ *"Caractérisation de Matériaux Thermodurcissables par Spectroscopie Ultrasonore"*, Émilie GOUIN, 2ème année IUT Mesures Physiques, Département Mesures Physiques, Blois, en stage au LUSI

# Activités de Recherche Universitaire

## Domaine de Recherche

IAE : Instrumentation Acoustique Non Linéaire et Electronique

TSA : Traitement du Signal Non Linéaire - Analyse des Systèmes Complexes

SIM : Simulation de dynamique/acoustique non linéaire

PNL : Physique Non linéaire - Physique des milieux complexes (hystérétiques)

1994- 1995	1995- 1998	1998- 1999	1999- 2000	2000- 2001	2001- 2002	2002- 2003	2003- 2004	2004- 2005	2005- 2006	2006- 2007	2007- 2008
	IAE	IAE	IAE	IAE	IAE	IAE	IAE	IAE	IAE	IAE	IAE
PNL	PNL				PNL	PNL			PNL		
SIM	SIM								SIM	SIM	SIM
	TSA				TSA	TSA			TSA	TSA	TSA

## 2.1 Équipes et Projets de Recherche développés

### 2.1.1 Laboratoire Ultrasons Signaux et Instrumentation

- ✓ Période 1998-2008 : Équipe "Interaction Ultrasons-Matière" animée par J.-P. Reménieras et O. Bou Matar, puis "Matériaux Complexes et Dispositifs Piézoélectriques" animée par G. Feuillard : Mise en place d'une équipe : études des matériaux complexes par méthodes acoustiques non linéaires



MCF	Année de recrutement
Olivier Bou Matar	1998
Serge Dos Santos	1999
François Vander Meulen	2001
Lionel Haumesser	2002
Jérôme Fortineau	2007

**2005 – 2008** : **projet FULTI-TRAINS (Focalisation Ultrasonore pour la Localisation des Inclusions- TRA for Imaging of Nonlinear Systems)** en collaboration avec A. SUTIN (Stevens Institute of Technology, USA), A. SARVAZYAN (ARTANN LABORATORIES, USA), B. K. CHOI (Korean Ocean Research and Development Institute, KOREA), P. A. LEWIN (Drexel University, USA).

Une méthode de Retournement Temporel Acoustique (TRA) utilisant un récepteur ponctuel (vibromètre laser à la surface d'un matériau) a été conçu indépendamment, en 2002, au LUSSI et au Stevens Institute of Technology, USA. Du fait de cet intérêt commun, mais surtout, afin d'étudier la qualité de la focalisation du retournement dans différents milieux et matériaux, une collaboration a démarré en 2005, dans le but d'étudier, dans un premier temps expérimentalement, l'optimisation de cette focalisation pour des applications d'imagerie Non Linéaire des matériaux et des milieux biologiques. Deux expériences ont été conduites : une première utilisant un hydrophone dans l'eau pour les applications dans les fluides, et une deuxième utilisant un vibromètre laser pour les applications dans les solides. Ce travail préliminaire de collaboration entre le LUSSI et le groupe d'A. SUTIN et d'A. SARVAZYAN a permis d'explorer les avantages, les inconvénients et les limites de cette méthode de focalisation par Retournement Temporel pour l'exploration des milieux complexes. Les résultats montrent que la focalisation s'effectue que l'on soit dans un solide ou dans un liquide, conférant ainsi à cette méthode un potentiel d'applications important. Ce travail (réalisé dans le cadre d'un CRCT attribué sur le contingent du CNU 61 en 2005) consista à tester d'autres formes d'excitation, comme la corrélation ou une méthode avancée d'inversion de pulse, permettant, en utilisant les propriétés de symétrie, d'optimiser la focalisation par retournement et le traitement du signal associé. Les méthodes expérimentales associées de génération laser /détection d'ultrasons pour la propagation de pulses optimisés sont envisagées dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Nottingham (technologie laser) et le CENS (Center for Non-linear Studies) à Tallinn qui participe à la partie simulation de propagation non linéaire d'ondes acoustiques dans les solides. Ces collaborations ont données lieu à la soumission de trois propositions de projet Européens dans le cadre du FP7 : EMMASONICS, RAILCHECK, UNI-NEWS.

**2004 – 2008** : **projet AERONEWS (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy, 5 personnes (dont 1 Thésard), 368 k€ dont 169 k€ de contribution Européenne)**. Le projet NEWS associé au projet Européen **AERONEWS**, s'appuie sur les résultats obtenus au cours du projet NUCAM (Caractérisation ultrasonore de matériaux par techniques non linéaires). Un banc de caractérisation non linéaire des matériaux permettant des comparaisons quantitatives entre les méthodes classiques de CND et les méthodes non linéaires est en place au LUSSI et permet l'obtention de

résultats *via* une méthode d'insertion/substitution et une méthode étalonnée en contact. Compte tenu de la complexité des matériaux étudiés dans le secteur de l'aéronautique (partenaires industriels du projet), 3 WP de développement dans lesquels trois axes thématiques ont été abordés :

WP 1 : un aspect expérimental en validant et en adaptant les méthodes de mesures du paramètre non linéaire au cas des matériaux complexes (géométrie, composition, propriétés acoustiques, etc.) issus de l'industrie aéronautique.

WP 2 : un aspect modélisation en exploitant les méthodes pseudo-spectrales de résolutions numériques intégrant des conditions parfaitement absorbantes (Perfectly Matched Layers). Ces codes de simulations permettent en outre d'examiner le comportement non linéaires de milieux pouvant être complexes et dans lesquels les conditions initiales peuvent être arbitraires et, le cas échéant, optimisées.

WP 3 : un aspect technologique en envisageant une optimisation de la transduction acoustique dédiée à l'instrumentation non linéaire. L'utilisation de transducteurs multi-éléments utilisés en échographie médicale a été généralisée dans des applications CND. Une instrumentation complète d'émission ultrasonore, de traitement des signaux et des images a également été envisagée et appliquée sur site industriel.

WP5 : L'aspect validation des méthodes NEWS a été traitée au cours du projet à partir de la deuxième année. Les méthodes TR-NEWS et NEWS-TR ont pu être testées sur sites industriels.

L'obtention d'une " imagerie d'un paramètre non linéaire " pour le contrôle de santé des matériaux de l'aéronautique était l'objectif principal du projet Européen AERONEWS.

**1999 – 2003** : **projet NUCAM (Nonlinear Ultrasonic CAracterization of Materials)**. Parmi les diverses techniques de caractérisation des matériaux, les méthodes acoustiques présentent l'avantage de pouvoir mesurer de façon précise les propriétés mécaniques des matériaux sans les altérer : ce sont des méthodes non destructives. La procédure expérimentale la plus courante consiste à faire propager une onde ultrasonore dans l'échantillon à analyser et, par des mesures de vitesse et/ou d'atténuation, d'en déduire ses propriétés mécaniques. L'intérêt de cette méthode ultrasonore s'explique dans la mesure où elle permet de considérer non seulement des matériaux homogènes solides, liquides et gazeux, mais aussi des milieux hétérogènes comme les matériaux composites. On constate une demande croissante pour la caractérisation des micro-défauts présents dans les solides et responsables de leur dégradation mécanique (phénomène de fatigue) pouvant aller jusqu'à la rupture. Ces micro-défauts sont indétectables par les méthodes classiques utilisant l'acoustique linéaire. Durant les années 1990, on a montré l'intérêt de l'utilisation de résultats provenant des propriétés non linéaires de l'acoustique. Un banc de caractérisation des matériaux permettant des comparaisons quantitatives entre les méthodes classiques et les méthodes non linéaires a été mis en place et a permis l'obtention de résultats *via* une méthode d'insertion/substitution. La mesure du paramètre non linéaire de l'échantillon solide a été réalisée en s'affranchissant le plus possible de la non linéarité de l'eau. Le banc de mesure est réalisée par une mesure en immersion d'interactions paramétriques entre une onde haute fréquence sonde, et une onde basse fréquence



pompe. Ces interactions se traduisent par une modulation de la phase de l'onde haute fréquence sonde. Les mesures préalablement effectuées (nécessitant un étalonnage dans l'eau) ont été améliorées par la réalisation expérimentale d'un dispositif d'auto-calibration par mesures de réciprocité. Le paramètre non linéaire (proportionnel à l'indice de modulation de phase et à la vitesse de l'onde basse fréquence pompe) s'extrait alors par une démodulation numérique de l'onde haute fréquence sonde et par une mesure absolue de la vitesse de l'onde basse fréquence par auto-récaprocité. Le deuxième banc utilise l'interféromètre hétérodyne SH-130. On mesure à une extrémité des échantillons les déplacements produits par un train d'onde (ou une autre source arbitraire), généré à l'autre extrémité par un transducteur ultrasonore convenablement couplé à l'échantillon. Il s'agit d'étudier la propagation non linéaire des ondes acoustiques dans les matériaux ainsi que leur interaction avec les défauts présents dans les structures. Cette étude est accompagnée d'une optimisation des conditions de génération et de réception des ultrasons, avec une caractérisation complète du matériel utilisé (transducteurs, électroniques, milieu de couplage, etc.) du point de vue de leur comportement non linéaire. Ce travail de recherche a fait l'objet de 3 communications internationales, a servi de base de travail d'une stagiaire DUT Mesures Physiques, a fait l'objet d'une Thèse de Doctorat et d'un DRT par l'intermédiaire d'une collaboration avec le groupe Dassault-Aviation et l'Université d'Orléans. Cette étude est actuellement poursuivie et nos résultats expérimentaux nous a permis, dans le cadre du 6ème PCRD, de participer à l'élaboration d'un STREP : Health monitoring of aircraft by Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (AERONEWS), projet Européen en collaboration avec 17 partenaires européens.

**1998 – 2001** : **Responsable d'une étude de faisabilité (commandée par PSA Peugeot-Citroën : projet COPOL (CONtrôle de POSitionnement Latéral par ultrasons))**

Ce travail a démontré l'intérêt de l'utilisation d'ondes ultrasonores pour la détection de changement de rugosité d'une surface en mouvement. En effet, le signal ultrasonore rétrodiffusé possède non seulement l'information Doppler, mais aussi l'information relative aux propriétés du matériau constituant la surface rugueuse (grain, distribution spatiale des défauts, etc). La caractérisation de cette surface en mouvement est d'un intérêt primordial pour l'industrie automobile. Dans le cadre de la poursuite de ce contrat de recherche avec PSA, la caractérisation quantitative du matériau constituant la surface a été proposée dans le cadre d'un stage de DEA. Différentes surfaces de rugosité connue sont étudiées et caractérisées en Laboratoire. Une instrumentation d'acquisition des signaux est également implantée en vue d'un traitement de ceux-ci par des analyses de type temps-fréquence.

Ce travail de Recherche/Transfert de technologie a fait l'objet d'un rapport (44 pages), de 2 communications orales internationales et a constitué le sujet d'un DEA matériaux multi-échelles.

### 2.1.2 Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs

- ✓ Période 1995-1998 LPMO CNRS UPR 3203 - (Institut FEMTO), Besançon, dirigé par le Prof. Daniel Hauden, dans l'équipe "Modélisation et Intégration des Oscil-

### **lateurs et des Systèmes", animée par Rémi Brendel, Professeur à l'ENSMM**

Dans le cadre de cette recherche, nous avons étudié les propriétés physiques de la phase d'un oscillateur à quartz à 5 MHz par le modèle de Van der Pol. L'utilisation de méthodes modernes de traitement du signal issus de l'analyse des systèmes non linéaires (sections de Poincaré, espace des phases, arithmétique des fréquences) a révélé la présence de comportements multi-échelles de synchronisation caractérisés par de grandes constantes de temps. L'étude expérimentale a été réalisée à partir de l'asservissement non linéaire de deux oscillateurs à 5 MHz en présence de bruit blanc de fréquence et d'une perturbation périodique. Les mesures de bruit ont été réalisées à l'aide d'un banc de mesure de bruit de phase classique. Une transformation du bruit blanc en bruit en  $1/f$  a lieu lorsque le système évolue dans un régime très non linéaire. La vérification expérimentale des propriétés multi-échelles révéla une structure diophantienne du spectre d'intermodulation issue des propriétés arithmétiques des fréquences. Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance des effets non linéaires dans les problématiques de mesure de bruit de phase. Ces effets deviennent de ce fait responsables de cette remontée du bruit aux basses fréquences. Enfin, nous avons également confirmé de façon expérimentale que la présence d'une électronique non linéaire conditionne la formation de bruit en  $1/f$ ; bruit dont l'origine reste encore aujourd'hui inconnue.

Ce travail de recherche a fait l'objet de 5 publications dans une revue internationale ou nationale avec comité de lecture, 12 communications internationales avec actes.

### **2.1.3 Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne**

✓ **Période 1994-1995 (Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne LPUB Dijon, dirigé par le Prof. Hubert Berger, dans l'équipe "Ondes et Structures Cohérentes" animée par le Prof. Michel Remoissenet)**

Cette année d'initiation à la recherche a été effectuée au sein de l'équipe " Ondes et Structures Cohérentes ". Elle a porté sur l'étude de l'instabilité modulationnelle dans les systèmes discrets non linéaires de dimension finie. L'instabilité modulationnelle est présente lorsqu'une onde, soumise à une perturbation extérieure, se propage dans un milieu non linéaire et dispersif. Cette onde continue peut ainsi se briser au cours de la propagation en un train d'impulsions ultra courtes. L'instabilité modulationnelle se manifeste dans les fibres optiques bimodales non biréfringentes et possède diverses applications en optique non linéaire. Ceci ouvre alors la possibilité d'utiliser ces fibres pour la propagation de solitons puisqu'il est démontré que la présence d'Instabilité modulationnelle est la signature de l'existence de solitons. Ce phénomène a été étudié (bibliographie, théorie et simulations numériques) pendant le stage de DEA. Il s'agissait d'étudier l'apparition d'instabilité modulationnelle dans un réseau périodique de particules en interaction non linéaire et sous l'influence d'un substrat perturbatif. Nous avons étudié les effets d'instabilité modulationnelle en fonction du nombre de particules et montré qu'il existait un seuil d'instabilité dans le cas  $N=6$  modélisant la molécule de benzène. Cette étude s'inscrivait dans une action de recherche du LPUB sur les effets de l'instabilité modulationnelle qui allait donner naissance à une équipe de recherche exploitant l'instabilité modulationnelle pour des applications télécommunications optiques haut débit.

Ce travail de DEA a donné lieu à 2 communications avec actes lors de conférences internationales réunissant des spécialistes de la physique/optique non linéaire.

## 2.2 Liste des Contrats de Recherche

- ✓ **AERONEWS (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy 2004-2008) . Projet Européen du FP6 Specific Targeted Project AST3-CT-2003-502927, 6 chercheurs (dont 1 théoricien), Budget 356 k€.**

Responsable scientifique du LUSSI	: Serge Dos Santos		
Intervenants MCF	: Serge Dos Santos (40 %), Lionel Haumesser (20%), François Vander Meulen (20%), Olivier Bou Matar (10%), Samuel Callé (10%)		
Intervenants technicien et étudiants	: Marion Bailly (12MM), Thomas Goursolle (36MM), Camille Plag, Mathieu Domenjoud, Maxime Champod, Mounir Hadria		
Budget du projet AERONEWS	: 4.9 M€	Budget de l'équipe du LUSSI-FRE2448	: 356 k€
Contribution Européenne	: 3.6 M€	Contribution Européenne	: 185 k€
Nombre de Partenaires	: 18	Participation en Homme-Mois (MM)	: 77 MM

Le projet Européen AERONEWS (<http://www.kulak.ac.be/AERONEWS/>) s'inscrit dans la continuité des résultats obtenus au cours du projet NUCAM (Caractérisation ultrasonore de matériaux par techniques non linéaires) réalisé durant la période 1999-2004. Un banc de caractérisation non linéaire des matériaux permettant des comparaisons quantitatives entre les méthodes classiques et les méthodes non linéaires a permis l'obtention de résultats *via* une méthode d'insertion/substitution et une méthode calibrée en contact. À partir de 2005, les deux méthodes TR-NEWS et NEWS-TR combinant le retournement temporel et l'acoustique non linéaires ont été étudiées numériquement à l'aide de codes pseudo-spectraux et mises en place expérimentalement. L'étude de la nonlinéarité de la chaîne d'acquisition expérimentale a été initiée au cours de ce projet. Plus récemment, une méthode d'optimisation d'excitation ultrasonore "chirp-coded TR-NEWS" a été proposée pour améliorer la méthode d'inversion d'impulsion permettant d'extraire les nonlinéarités.

Ce projet a donné lieu à 32 rapports intermédiaires d'avancement des travaux, 23 rapports finaux (1000 pages au total), 6 communications internationales en collaboration avec les membres du projet, et à la rédaction de 4 propositions de projets dans le cadre du FP7.

- ✓ **COPOL (CONtrôle de POsitionnement Latéral par ultrasons - 1998-2001) : Responsable d'une étude de faisabilité (budget 90kF) commandée par Peugeot-Citroën**

**SA. Intervenants :** (S. Dos Santos 70%, P. Maréchal, Étudiant M2R 10% ; C. Chenu, MCF 10% ; J-M Girault, MCF 5% ; O. Bou Matar, MCF 5%). Ce travail a démontré l'intérêt de l'utilisation d'ondes ultrasonores pour la détection de changement de rugosité d'une surface en mouvement. En effet, le signal ultrasonore rétrodiffusé possède non seulement l'information Doppler, mais aussi l'information relative aux propriétés surfaciques du matériau constituant la surface rugueuse (grain, distribution spatiale des défauts, etc.). La caractérisation de cette surface en mouvement est d'un intérêt primordial pour l'industrie automobile qui a, depuis 2004 sur la Citroën C3 et la C5, implémentée depuis la fonction **AFIL** pour ( Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne) qui est toutefois basée sur une technologie infrarouge. Dans le cadre de la poursuite de ce contrat de recherche avec PSA, la caractérisation quantitative du matériau constituant la surface a été proposée dans le cadre du stage de Master de Pierre Maréchal. Différentes surfaces de rugosité connue ont été étudiées et caractérisées au LUSSI. Une instrumentation d'acquisition des signaux a également été développée en vue d'un traitement du signal de type temps-fréquence, basée sur des estimateurs statistiques de type skewness ou kurtosis.

Ce travail de Recherche/Transfert de technologie a fait l'objet d'un rapport d'activité (44 pages) , de 2 communications orales internationales et a constitué le sujet d'un DEA matériaux multi-échelles. Ce travail a été référencé 1 fois dans les travaux d'une équipe du Gorgia Institute of Technology.

✓ **Contrats en cours de re-soumission FP7 :**

- # UNI-AERO Ultrasonic Nonlinear Imaging for Structural Health monitoring and Nondestructive Evaluation of Aerostructures : 4 ans, 12 partenaires, 5.2 M€ (évaluation EU 2007 FP7-213818 : 21/30, non re-soumis en 2008)
- # EMMASONICS Evaluation of MetaMaterials for Aerostructures using Smart Ultrasonics : 3 ans, 4 partenaires, 1.3 M€ (évaluation EU 2007 FP7-213888 : 16/30 non re-soumis en 2008)
- # RAILCHECK Improvements To The Safety And Security Of Rail Transport Systems : 4 ans, 9 partenaires, 3.6 M€ (évaluation EU 2007 FP7-218534 : 17/30, évaluation EU 2008 FP7-233710 : 20/30)

## 2.3 Mobilité thématique et géographique dans des Universités Étrangères

1. **Long Visiting period (13 juin-25 juillet 2005) at ARTANN Laboratories, USA invité par Armen Sarvazyan, fondateur d'Artann.** Cette collaboration a permis de développer (<http://www.artannlabs.com/news.php>) un système expérimental d'imagerie locale de la nonlinéarité d'un milieu complexe (milieu liquide à bulles) en utilisant la symbiose des méthodes de retournement temporel et d'acoustique non linéaire (NL-TRA). Cette méthode entraine dans le projet SYANTRA (Symmetry Analysis for Time Reversal Acoustics) proposé dans le cadre du CRCT obtenu en 2005. Au cours de cette période de visite, nous avons validé expérimentalement la méthode NL-TRA couplée à une excitation symétrisée utilisant l'inversion d'impulsion et le retournement par corrélation entre une

excitation de type balayage de fréquence et sa réponse. Cette collaboration a permis de présenter au cours du 17th ISNA en 2005 les premiers résultats validant la méthode dans un milieu liquide fortement non linéaire constitué de bulles. Cette approche, a permis la naissance des deux méthodes TR-NEWS et NEWS-TR appliquées en CND, et a été confirmée comme étant une méthode extrêmement prometteuse lors du 18th ISNA (L.A. Ostrovsky and O. Rudenko, " *What problems of Nonlinear Acoustics Seem to be Important and Interesting Today?* " , in " *Nonlinear Acoustics - Fundamentals and Applications* ", proc. of the 18th International Symposium of Nonlinear Acoustics, edited by B.O. Enflo, C.M. Hedberg, and L. Kari, American Institute of Physics, pp 9-18 (2008))

2. **Short Visiting period (19-25 septembre 2005) at Nottingham University, UK, invité par le Prof. Mike Somekh, Responsable du Dept. of Elec. Engineering et par Dr. Theodosia Stratoudaki.** La méthode de modulation de phase développée au LUSI dans le cas de couplage entre ondes de surfaces et ondes longitudinales a été transposée sur un laser d'émission G-CHOT utilisant un modulateur électro-optique permettant de générer un profil spatial et temporel d'excitation arbitraire des signaux. Cette collaboration a conduit à la mise en place, en mai 2007, d'une proposition de projet Européen dans le cadre du FP7 (EMMASONICS) dont le but est d'utiliser cette technologie d'émission et de réception laser (G-SHOT et D-CHOT) pour l'investigation ultrasonore de la propagation non linéaire d'ondes solitaires dans les matériaux dispersifs par périodicité de structures (composites de l'industrie aéronautique) en collaboration avec NDT Expert-France, industriels sous-traitant de Airbus, experts en Contrôle Non Destructif
3. **Short Visiting période (31 octobre-13 novembre 2005) at Stevens Institute, USA, invité par Alexander Sutin, chercheur au Davinson Laboratories (New York).** Cette collaboration, réalisée au cours du CRCT, a permis de poursuivre l'étude démarrée à **Artann Laboratories** par la prise en compte des problèmes expérimentaux liés à la calibration des mesures effectuées durant la première période. Des mesures ont été effectuées en collaboration avec l'Université de Drexel à Philadelphie (Peter A. Lewin) disposant de moyens de métrologie ultrasonore adaptés.
4. **Short working week (22-26 mai 2006) at VZLU Aeronautic Center, Prague, République Tchèque.** Expériences de validation de TR-NEWS sur des structures aéronautiques complexes (en collaboration avec K. Van den Abeele et P.Y. Le Bas). Dans le cadre du Projet AERONEWS, 10 partenaires se sont retrouvés pour mener des expériences de validation des méthodes acoustiques non linéaires NEWS sur des structures aéronautiques complexes ("wing panel" et "attachment lugs"). En collaboration avec l'Université de Courtrai, nous avons, avec Thomas Goursole et dans le cadre de sa thèse de Doctorat, réalisé les premières expériences TR-NEWS sur site avec du matériel commun aux deux laboratoires.
5. **Short working period (26 janvier-1 février 2007) Université d'Exeter, UK. Expériences de validation de Sweep TR-NEWS et NEWS-TR sur des structures aéronautiques complexes (en collaboration avec K. Van den Abeele et P.Y. Le Bas).** Dans le cadre du Projet AERONEWS, des expériences en laboratoire ont été menées sur des structures aéronautiques complexes ("actuator bracket" and "fork



leg") pour préparer les expériences de validation des méthodes acoustiques non linéaires NEWS sur site industriel. En collaboration avec l'Université de Courtrai (K. Van den Abeele et P.Y. Le Bas), nous avons poursuivi nos expériences TR-NEWS et NEWS-TR avec la méthodologie commune aux deux laboratoires.

6. **Short working week (26 mai-1 juin 2007) at VZLU Aeronautic Center, Prague, République Tchèque.** Une expérience en collaboration avec le groupe DAKEL a été également réalisée ayant pour but de comparer la méthode chirp-coded TR-NEWS avec l'émission acoustique (AE) très utilisée en CND aéronautique. Dans le cadre du Projet AERONEWS, 11 partenaires se sont à nouveau retrouvés pour poursuivre les expériences de validation des méthodes acoustiques non linéaires NEWS sur d'autres structures aéronautiques complexes ("actuator bracket" et "fork leg"). En collaboration avec l'Université de Courtrai (K. Van den Abeele et P.Y. Le Bas), nous avons poursuivi nos expériences TR-NEWS et NEWS-TR sur site avec la méthodologie commune aux deux laboratoires.
7. **Short Visiting period (11 dec 2006 ) at Center of Nonlinear Studies, Tallinn University.** À l'initiative des Prof. J. Engelbrecht et A. Salupere, une collaboration a démarré concernant l'étude par simulation numérique de la propagation non linéaire d'ondes acoustiques de type soliton dans des milieux complexes non linéaires et dispersifs par périodicité. L'objectif étant de proposer une méthode de type pulse/echo de caractérisation ultrasonore de la dégradation des structures composites de l'aéronautique par modification de la signature non linéaire. Cette collaboration permettra de tester numériquement les expériences effectuées en partenariat avec l'Université de Nottingham.
8. **Short working period (31 octobre-2 nov 2007) at Stevens Institute, USA** à l'initiative d'Alexander Sutin et en collaboration avec Laurent Fillinger afin de tester l'interferomètre photo-réfractif Bossa Nova couplé à la méthode NL-TRA en mode sweep. Les expériences réalisées sur un échantillon solide fissuré ont permis d'atteindre un niveau local de déplacement acoustique de 100 nm, focalisé spatialement et temporellement.

Type	Durée (semaines)	Laboratoire	Lieux/Pays	Thématique
Séjour invité	6	ARTANN Labs	Trenton - USA	NL-TRA
Séjour invité	2	Stevens Institute	New York - USA	NL-TRA
Séjour invité	1	Nottingham Univ.	UK	acousto-optique NL
Working week	1/2	Katholieke Univ.	Belgique	TR-NEWS/ NEWS-TR
Working week	1/2	VZLU	Rép. Tchèque	TR-NEWS/ NEWS-TR
Working week	1/2	CENS	Estonie	Solitons et composites
Working week	1/2	Exeter University	UK	Sweep TR-NEWS
Working week	1/2	VZLU	Rép. Tchèque	Sweep TR-NEWS
Working week	1/2	ARTANN Labs	Trenton - USA	Sweep NL-TRA

## 2.4 Animation et Diffusion Scientifique - Groupes de Recherche

- ✓ **Membre actif** de Sociétés Savantes (SFA + IEEE) : membre du GAPSUS de la SFA et IEEE France
- ✓ **Membre** du comité d'organisation du CFA 2006 à Tours : organisation logistique
- ✓ **Membre** de sociétés savantes : SFP (2003-2007), SFMC (depuis 2000), Club EEA (1999-2004)
- ✓ Participation à un article " *le Non Linéaire enfin domestiqué* " de J.C. Guezal, Industrie et Technologie, N° 0850 , Septembre 2003
- ✓ **Animateur** du Thème Transverse " *Acoustique Non Linéaire* " au sein du LUSI (2003-2007)
- ✓ Participations actives (15 oct 2006, 9 oct 2007) à la " Fête de la Science " : mise en place d'expériences de mesures interférométriques laser à l'échelle du nanomètre et d'une conférence en collaboration avec le Prof. Léandre Pourcelot et le Dr. Marielle Defontaine : " *Europe, espace et aéronautique. La santé des astronautes et des matériaux surveillée par ultrasons* ", 9 oct 2007, Tours
- ✓ Organisation de séminaires de recherche au LUSI
  - ↳ **Pr. Alexander Sutin**, " *Nonlinear Acoustic Methods of Crack and Damage Detection* ", Stevens Institute of Technology Hoboken NJ USA, Los Alamos National Laboratory, USA, 19 Novembre 2003 10h, LUSI, EIVL, BLOIS
  - ↳ **Pr. Alexander Sutin**, " *New Approaches of Nonlinear Acoustics for Medical Diagnostics* ", Stevens Institute of Technology Hoboken NJ USA, Los Alamos National Laboratory, USA, 19 Novembre 2003, 15h30-16h LUSI, Bat. Vialle, Hôpital Bretonneau, TOURS
  - ↳ **Pr. Alain Oustaloup**, " *La dérivation non entière : théorie, synthèse et applications* ", Laboratoire LAP Automatique, Productique, Signal et Image - Université Bordeaux 1 - École Nationale Supérieure d'Électronique, Informatique et Radiocommunications de Bordeaux, 3 déc 2003
  - ↳ **Dr. Théodosia Stratoudaki**, " *Cheap Optical Transducers (CHOTs) : Stripes will make your frequency spectrum look ... thinner !* ", Applied Optics Group, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham, University Park, Nottingham, NG7 2RD, United Kingdom, 18 décembre 2006
  - ↳ **Dr. Emmanuel Desurvire**, " *Amplification par Fibre Dopée à l'Erbium : une Révolution des Télécommunications Optiques* ", Thales Research and Technology, Physics Research Group, Director, 91767 Palaiseau cedex - France, 7 février 2008
  - ↳ **Dra. Isabel Pérez Arjona**, " *Self-Organization in Acoustics* ", Institut de Investigació per a la Gestió Integrada de las Zonas Costaneres (IGIC), Escola Politècnica Superior de Gandia Carretera Nazaret-Oliva, 46730 Grau de Gandia (València), 5 juin 2008

### 2.4.1 Accueil de Chercheurs d'une Équipe de Recherche Internationale

- ✓ Student Researcher from IZFP (Saarbruecken, Germany) , mai 2005 dans le cadre du projet AERONEWS. L'objectif de cette étude consistait à mesurer la nonlinéarité intrinsèque des transducteurs utilisés dans le cadre des expériences en génération d'harmonique (IZFP) et en modulation de phase (LUSSI). Cette étude a permis de mesurer l'importance de la nonlinéarité dans une chaîne d'acquisition et de traitement du signal lorsque l'on effectue des mesures d'harmoniques et a permis de confirmer la validation de la stratégie d'utiliser une excitation multi-fréquences (méthodes d'interactions paramétriques générant l'intermodulation des fréquences).
- ✓ Researchers from Nottingham University (Dr. T. Stratoudaki et I. Collison) , les 18-21 dec 2006 dans le cadre du projet AERONEWS. L'objectif de cette étude consistait à comparer les mesures d'interférométrie laser à base de vibromètre (Polytec) et à base de "knife-edge detection" pour des mesures étalonnées de nonlinéarité acoustique générées par l'interaction paramétrique entre une onde de surface et une onde de volume, générant une modulation de phase de l'onde de surface dépendante de la nonlinéarité du matériau analysé. Cette collaboration a permis de soumettre un projet Européen (EMMASONICS) dans le cadre du FP7 visant à valider ces méthodes dans le cas des matériaux composites de l'industrie aéronautique.

### 2.4.2 Chairman de Conférences

- ✓ Chairman de la session " **Time Reversal Acoustics for Nonlinear Imaging** ", lors du congrès international de l'ASA-EEA-SFA **ACOUSTICS'08**, 01-04 juillet 2008
- ✓ Chairman de la session " **General Theory and Numerical Methods of Nonlinear Acoustics** ", lors du congrès ISNA18th (International Symposium on Nonlinear Acoustics), 7-10 juillet 2008
- ✓ Chairman de session lors des **3ème Rencontres Jeunes Chercheurs**, 29 mars 2008, Blois
- ✓ Chairman de session poster au 3rd International **Workshop NDT in Progress**, Prague, Nov 2005
- ✓ Chairman de session du " **Forum des Électroniciens du Centre** " , CRESITT Industries, Nov. 2001, Blois



## 2.5 Encadrement Doctoral et Master Recherche

### 2.5.1 Stages de Master Recherche

Année 2007-2008	"TR-NEWS et Emission Acoustique :comparaison par méthode avancée d'inversion de pulse pour l'extraction des nonlinéarités ", Mathieu Domenjoud	M2R " Electronique, signal et Microsystèmes ", Université d'Orléans-Université de Tours	100 %
Année 2006-2007	"Inversion de Pulse avancée et Symétries de Lie pour l'optimisation de l'extraction de la signature acoustique non linéaire" , Mathieu Domenjoud	M2R " Phénomènes Non Linéaires ", Université François Rabelais de Tours,	100 %
Année 2005-2006	"Réduction et résolution d'équations par la méthodes d'analyse des symétries. Application aux équations de l'acoustique non linéaire" , Camille Plag	M2R " Phénomènes Non Linéaires ", Université François Rabelais de Tours, (Major de Promotion)	100 %
Année 2003-2004	"Mesures ultrasonores du paramètre non linéaire de solides : application au contrôle de santé des matériaux", Thomas Goursolle	DEA d'Acoustique du Mans - Université du Maine	100 %
Année 2001-2002	"Contrôle des collages par spectroscopie acoustique non linéaire dans les structures composites ", Valérie Saint-Jean	DRT en collaboration avec Dassault Aviation et le LESI (Laboratoire d'Electronique des Signaux et des Images - Université d'Orléans)	50 %
Année 2000-2001	" Caractérisation Ultrasonore de Rugosité de Surfaces en Mouvement ", Pierre Maréchal	M2R " Matériaux Multi-échelles ", Université d'Orléans	100 %

### 2.5.2 Thèses de Doctorat

- ✓ Année 2004-2007 : Thomas Goursolle, co-encadrement (70 %) de Thèse de Doctorat avec J.P. Remieneras (HDR), "**Propriétés acoustiques non linéaires classiques et non classiques : Applications au contrôle de santé des matériaux de l'industrie**

**aéronautique"**, soutenue le 7 décembre 2007, mention Très Honorable avec Félicitations du Jury ([www](http://www.enscm.fr))

- ✓ Année 2000-2004 : Michel VILA, co-encadrement (10 %) de Thèse de Doctorat avec Olivier Bou Matar (50 %), Francois Vander Meulen (30 %), Marc Lethiecq (HDR 10 %) "**Caractérisation Ultrasonores de Matériaux par des méthodes d'Acoustique Non Linéaire**", soutenue le 28 mai 2004, mention Très Honorable

## 2.6 Activités d'Evaluation Scientifique et Technique - Comités de Relecture

### 2.6.1 Participation à des Jurys de Thèse

- ✓ *Théorie et Simulation de la Conjugaison de Phase Magnéto-Acoustique*, Mme QI Zhang, Laboratoire de Mécanique de L'Université de Lille, 19 juin 2008

Jury de thèse :

- Alain Merlen, Université de Lille 1
- Philippe Pernod, Ecole Centrale de Lille
- Daniel Royer, Université de Paris 7
- Jean-Michel Genevaux, Université du Maine
- Vladimir Preobrazhenski, Ecole Centrale de Lille
- Olivier Bou Matar, Ecole Centrale de Lille
- Petr Voinovich, Ioffe Institute de St Petersburg, Russie
- Serge Dos Santos, ENI Val de Loire

- ✓ *Propriétés acoustiques non linéaires classiques et non classiques : Applications au contrôle de santé des matériaux de l'industrie aéronautique*, T. Goursolle, LUSI-CNRS FRE2448, 7 déc 2007

Jury de thèse :

- Bernard Cretin, Professeur à l'ENSMM, Besançon
- Mickaël Tanter, Directeur de Recherche INSERM, Paris
- Olivier Bou Matar, Professeur à l'École Centrale, Lille
- Frédéric Patat, Professeur à l'Université François-Rabelais, Tours
- Jean-Pierre Remeniéras, Ingénieur de Recherche (HDR), Tours
- Koen Van Den Abeele, Professeur à l'Université Catholique de Louvain, Belgique
- Serge Dos Santos, Université François Rabelais de Tours, Blois

- ✓ *Étude des écoulements redressés en régime transitoire dans des résonateurs annulaires à ondes progressives et stationnaires*, M. Mohamed Amari, Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, 30 Mars 2004

Jury de thèse :

- Vitaliy Gusev, LPEC, Université du Maine
- Joël Gilbert, CNRS, Université du Maine
- Nicolas Joly, LAUM, Université du Maine
- François Coulouvrat, CNRS, Université Pierre et Marie Curie

- Luc Mongeau, RWHL, Indiana Purdue University, Canada
- Serge Dos Santos, Université François Rabelais de Tours

### 2.6.2 Reviewer

- ✓ Reviewer d'articles dans des revues internationales Total : 8
  - ↳ IEEE Trans. on Ultras. Ferr. and Freq. Control (IF2006 1,819) : 1
  - ↳ Journ. of Acous. Society of America (IF2006 1,433) : 3
  - ↳ Ultrasonics (IF2006 1,322) : 2
  - ↳ Int Journal of Non-linear Mechanics (IF2006 1,206) : 2
- ✓ Rapports d'expertise de projets européens INTAS <http://www.intas.be> : 3
- ✓ Auteur de **14 rapports d'expertise** dans la catégorie " Electronique et Electrotechnique " pour l'attribution du **Prix de l'Ingénieur de l'Année** délivré par les revues techniques " l'Usine Nouvelle " et " Industrie et Technologie " depuis 2004

## 2.7 Relations avec le monde industriel

De part mon affectation dans une École d'Ingénieurs et mon implication dans la responsabilité d'une option de 5ème année, les relations avec le tissu industriels ont toujours été très intenses. De plus, par sa structure de Groupement d'Intérêt Public, le GIP Ultrasons contribua à part entière à une relation permanente avec le monde industriel. Enfin, le projet de Recherche AERONEWS a permis une collaboration très importante avec les industriels Européens impliqués dans le projet :

- la société **ZD Rpety - DAKEL**, Ohrobecká 408, 142 00 Praha 4, Czech Republic avec laquelle nous avons étudié les prototypes de transducteurs bi-fréquence et avec laquelle nous avons effectué les premières mesures comparatives entre les méthodes de CND classiques (Émission Acoustique) et TR-NEWS et NEWS-TR
  - la société **Bodycote Materials Testing AB (BMT)**, Linköping, Sweden, avec laquelle nous avons effectué les expériences préliminaires de propagation de pulses dans les matériaux composites
  - la société **NDT Expert**, Toulouse avec laquelle nous avons soumis le projet EMMA-SONICS sur la caractérisation non destructive des matériaux composites
- ✓ Dans ce contexte, le transfert de Technologie (130 kF contrats industriels) avec le groupe Peugeot-Citroën SA s'est matérialisé concrètement par un stage de DEA dans lequel le groupe oriente les objectifs et par l'apport constant de projets de fin d'études Ingénieurs (3ème cycle) qui a conduit à deux CDI d'élèves EIVL au sein du groupe
  - ✓ Une collaboration avec le groupe **Dassault Aviation** est en cours depuis septembre 2001 ayant pour thème la caractérisation ultrasonore des collages par acoustique non linéaire. Cette collaboration a commencé par un travail expérimental constituant le

thème un stage de DRT

- ✓ Une collaboration avec le groupe **Samsung** a démarré en novembre 2007 dans le but d'appliquer les méthodes TR-NEWS et NEWS-TR pour la caractérisation de fissures et délaminations dans les composites en vue d'applications navales (détection de fuites gazeuses dans les méthaniers)

Cette relation avec le milieu industriel a facilité l'organisation de séminaires d'industriels dans le cadre d'une option de 3ème cycle en École d'Ingénieurs, et a facilité l'encadrement, entre autres, de 10 PFE dans l'industrie aéronautique et 7 PFE dans l'industrie automobile.



# Activités de Responsabilités Administratives

## 3.1 Responsabilités associées à l'enseignement

- 2007-      **Responsable pédagogique 4ème année de l'ENI Val de Loire (M1) :**  
Organisation de l'évaluation des enseignements - Validation des contrats d'étude ERASMUS des élèves ENIVL à l'étranger
- 2007-      **Membre titulaire élu et Vice-Président MCF** de la Commission de Spécialistes Pluridisciplinaire de l'ENI Val de Loire
- 2007-      **Membre suppléant élu** du Conseil d'Administration de l'ENI Val de Loire
- 2007-      **Membre suppléant élu** du Conseil Scientifique et Technique de l'ENI Val de Loire
- 2007-2008      **Membre suppléant (extérieur)** de la Commission de Spécialistes 61-63ème de l'Université de Tours
- 2006-2008      **Membre** du groupe chargé des Relations Internationales de l'ENI Val de Loire en charge des collaborations avec les Etats-Unis et la République Tchèque :
  - ✓ mise en place de cours à l'Université Technologique de Prague (Nov 2007, Dec 2008)
  - ✓ mise en place de cours à l'ENIVL donnés par des chercheurs étrangers (2008-2009)
  - ✓ organisation de la 1ère semaine internationale à l'ENIVL (22-27 oct 2007)
  - ✓ responsable de la mise en place de la participation de 7 élèves ingénieurs ENIVL à la première International Summer School (ENIVL 3ème année) au **Stevens Institute of Technology**, New York, USA, 1-30 juin 2008 : BELAABED Yassine, DOBOL Sébastien, FERJANI Mehdi, LARRIEU Julien, MINARD Benoit, SUTTER Aurélien, YAA-COUBI Illyasse
- 2006-2008      **Membre de l'équipe pédagogique et du jury du Master ESM** (Co-habilitation Université de Tours - Université d'Orléans - ENI Val de Loire)

- 2001-2007 **Membre titulaire élu** de la Commission de Spécialistes 61-63ème de l'Université de Tours
- nov 2003 **Rédacteur pour l'EIVL** du dossier de "Demande d'inscription sur la liste des Grandes Écoles d'Ingénieurs dont les élèves peuvent postuler à une bourse de Doctorat pour Ingénieurs du CNRS"
- 1999-2003 **Co-responsable** de l'Option SAI de 5ème année à l'EIVL (Systèmes Automatisés et Instrumentation). Effectif : 9 (2000-2001), 6 (2001-2002); 16 (2002-2003); 32 (2003-2004)
- ✓ Organisation de l'emploi du temps, des soutenances de projets et de l'information des élèves
  - ✓ Organisation de séminaires avec invitation d'industriels (11 pendant 2 ans)
  - ✓ Responsabilité du suivi et des soutenances des projets d'option et de projets de fin d'étude
- 1999-2001 **Responsable** du groupe chargé des Relations Internationales à l'EIVL
- ✓ Responsable des échanges d'élèves avec l'Espagne, la Chine, le Brésil
  - ✓ Responsable des stages à l'étranger (accords Léonardo)
  - ✓ Coordination générale des activités internationales (réunions d'information auprès des élèves, salon, déplacement de prospection, etc.)
  - ✓ Responsable auprès du programme " N+1 "
  - ✓ Rédacteur et rapporteur du " Projet de Développement des Relations Internationales " dans le cadre du projet de transformation de l'EIVL en INSA (année 2000)

## 3.2 Responsabilités associées aux activités de Recherche

### 3.2.1 Responsabilités au sein du LUSSE

- ✓ Représentant de l'équipe " Interaction Ultrasons-Matière " au Conseil de laboratoire (2002-2004)
- ✓ Mise en place et Responsable Scientifique du projet Européen FP6 AERONEWS (2003-2008)
- ✓ Responsable scientifique du contrat industriel COPOL COntôle de POsitionnement Latéral par ultrasons) avec le groupe PSA Peugeot-Citroën (1998-2001)
- ✓ Co-responsable scientifique (avec Olivier Bou Matar) du projet interne NUCAM (Nonlinear Ultrasonic CARacterization of Materials) (1999-2004)
- ✓ Animateur du thème transverse du LUSSE " Acoustique Non Linéaire " (2003-2007)
- ✓ Responsable de la rédaction de demande de moyens et d'équipement pour le LUSSE au niveau local (Région Centre), national (ACI, ANR) et Européen du FP6 (AERO-

NEWS, SYANTRA) et FP7 (voir section 2.2) :

- Année 2005 : dossier de demande d'équipement en co-financement avec le conseil régional de la région Centre (accepté) ; : Système Ultrasonore d'Analyse et de Contrôle Non Destructif de la Dégradation des Matériaux : Application au Contrôle de Santé des Structures Aéronautiques
- Année 2006 : Projet ANR Blanc, Magnéto-Acoustique non linéaire de la matière condensée et Applications (refusé), en collaboration avec l'IEMN (Philippe Pernot et Olivier Bou Matar), le LML (Alain Merlen)
- Année 2003 : ACI "Jeunes Chercheuses et Jeunes Chercheurs" (refusé), Titre du projet : *CND par spectroscopie acoustique non linéaire : optimisation de l'émission ultrasonore pour une imagerie du paramètre non linéaire*, en collaboration avec L. Haumesser et F. Vander Meulen

### 3.2.2 Comité d'organisation de manifestations

- ✓ **Membre du comité d'organisation du CFA 2006 à Tours** : organisation logistique et organisation, en collaboration avec le Prof. Vitalyi Gusev, d'une session spéciale "Acoustique Non Linéaire et NDT"
- ✓ **Co-organisateur d'une École Thématique du CNRS**. Sur l'initiative de Michel Planat (directeur de Thèse), une école thématique intitulée "Arithmétique, Topologie et Physique du Bruit de Fréquence des Oscillateurs : Progrès Récents et Modélisations" a été organisée en 1996. Elle a réuni à la fois les **spécialistes du temps-fréquence** et des **spécialistes de la physique non linéaire**. La gestion et la mise en page des articles et résumés, la correspondance avec les participants et les intervenants, et la réalisation d'un site Internet m'ont été confiées

### 3.2.3 Comité d'organisation scientifiques

- ✓ Organisation d'une Session Spéciale lors du congrès CFA 2006 de la Société Française d'Acoustique " **Acoustique Non Linéaire et NDT** " en collaboration avec le Prof. Vitalyi Gusev ; 25 présentations internationales
- ✓ Organisation d'une Session Spéciale lors du congrès international de l'ASA (American Society of Acoustics) -EEA-SFA ACOUSTICS08, juillet 2008 : " **Physical Acoustics : Time Reversal Acoustics for Nonlinear Imaging** " en collaboration avec le Pr. Alexander Sutin, Stevens Institute of Technology : 12 présentations internationales (see announcement in Acta Acustica, **94**, Suppl. 1, p. 867 (2008))





## Publications associées aux activités

Articles à parution dans un journal international	9
Communications internationales avec actes et comité de lecture	3
Communications internationales invitées avec publication dans un ouvrage	4
Communications internationales invitées	1
Communications nationales invitées avec publication dans une revue	1
Communications internationales à comité de sélections avec actes	26
Communications nationales à comité de sélections avec actes	10
Communications internationales à comité de sélections sans actes	16
Séminaires	14
<b>TOTAL</b>	<b>84</b>

### **Articles à parution dans un journal international (9)**

1. S. DOS SANTOS and C. PLAG. Excitation symmetry analysis method (esam) for calculation of higher order nonlinearities. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 43 :164–169, 2008.
2. T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, O. BOU MATAR, and S. CALLÉ. Nonlinear based time reversal acoustic applied to crack detection : Simulations and experiments. *Int. J. Nonlinear Mech.*, 43 :170–177, 2008.
3. T. GOURSOLLE, S. CALLÉ, S. DOS SANTOS, and O. BOU MATAR. A two dimensional pseudospectral model for time reversal (TR) and nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). *J. Acoust. Soc. Am.*, **122**(6) :3220–3229, 2007.
4. M. VILA, F. VANDER MEULEN, S. DOS SANTOS, L. HAUMESSER, and O. BOU MATAR. Contact phase modulation method for acoustic nonlinear parameter measurement in solid. *Ultrasonics*, **42**(1-9) :1061–1065, 2004.
5. S. DOS SANTOS and M. PLANAT. Generation of 1/f noise in locked systems working in nonlinear mode. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect. Freq. Contr.*, 47 :1147–1151, 2000.
6. S. DOS SANTOS and M. PLANAT. *Fractals and Beyond : complexity in the Science*, chapter Arithmetical Fractals in an Electronic Loop, pages 297–306. World Scientific, New York, octobre 1998.
7. S. DOS SANTOS and M. PLANAT. 1/f spectrum in a nonlinear electronic loop : consequences in frequency standards and signal processing. *Ann. des Télécom.*, 53 :488–494, 1998.

8. F. LARDET-VIEUDRIN, S. DOS SANTOS, and M. PLANAT. Blocage par injection de modes sous-harmoniques d'un oscillateur utilisant une ligne à retard à ondes de surfaces. *Ann. des Télécom*, 51 :330–334, 1996.
9. M. PLANAT, F. LARDET-VIEUDRIN, G. MARTIN, S. DOS SANTOS, and G. MARIANNEAU. Frequency stability enhancement from carrier-envelope resonance in a surface acoustic wave delay line oscillator. *J. Appl. Phys.*, 80 :2509, 1996.

#### **Communications internationales avec actes et comité de lecture (3)**

10. S. DOS SANTOS, M. DOMENJOURD, and C. PLAG. Symmetry analysis applied to nonlinear acoustics : Principle and application for acoustic signal processing. In *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA*, ISBN : 978-0-7354-0544-8, pages 46–49, Stockholm, Sweden, 2008.
11. T. GOURSOLLE, S. CALLÉ, O. BOU MATAR, and S. DOS SANTOS. Amplitude dependence of the parametric interaction components inside the retrofocusing area with nonlinear time reversal acoustics. In *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA*, ISBN : 978-0-7354-0544-8, pages 521–524, Stockholm, Sweden, 2008.
12. M. PLANAT, S. DOS SANTOS, and F. LARDET-VIEUDRIN. "Physical Applications and Mathematical Aspects of Geometry, Groups and Algebras", *proc. of the XXI Int. Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics*, chapter A Teichmüller approach of a pulse oscillator : fine structure of carrier-envelope interactions, pages 929–933. World Scientific, Singapour, 1997.

#### **Communications internationales invitées avec publication dans un ouvrage (4)**

13. Z. PREVOROVSKY and S. DOS SANTOS. Nonlinear ultrasonic spectroscopy used to crack detection in aircraft wing panel. In Pavel Mazal, editor, *Proc of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing and in NDT Welding Bulletin*, number ISSN 1213-3825, pages 25–32, 2006.
14. T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, F. VANDER MEULEN, and L. HAUMESSER. Contact phase modulation measurements in bilayer solids using nonlinear means. In *Proceedings of the IIIrd workshop of "NDT in progress"*, pages 93–102, Prague, 2005.
15. T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER, and O. BOU MATAR. Ultrasonic parametric imaging of metallic samples using nonlinear acoustic measurements. In *Proceedings of Joint Workshop of Russian Acoustical Society (RAS) and French Acoustical Society (SFA)*, see announcement in *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (2), p 678, 2006), , ISBN 5-89118-383-8, pp 75-80 (2005), pages 120–128, Moscow, 2005. invited paper.
16. L. HAUMESSER, O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, and F. VANDER MEULEN. Transmission through and reflection from a fluid elastic layer : quasi-linear approximation. In *1st joint workshop of Russian Acoustical Society (RAS) and French Acoustical Society (SFA) on high intensity acoustic waves in modern technological and medical applications*, see announcement in *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (2), p 678, 2006), , ISBN 5-89118-383-8, pp 75-80 (2005), 2005. invited paper.

### **Communications internationales invitées (1)**

17. O. BOU MATAR, T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, and S. CALLÉ. 2d and 3d pseudo spectral time domain simulations of elastic waves propagation in nonlinear hysteretic heterogeneous solids : applications to time reversal imaging of damaged materials. In *proc of the 19<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*, Madrid, Spain, 2007. invited paper.

### **Communications nationales invitées avec publication dans une revue (1)**

18. K. VAN DEN ABEELE and S. DOS SANTOS. Détection et localisation de micro-dégradation de matériaux par spectroscopie d'ondes élastiques non linéaires. *Acoustique et Technique*, 45 :17–27, 2006.

### **Communications internationales à comité de sélections avec actes (26)**

19. T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, S. CALLÉ, and O. BOU MATAR. 3d pstd simulations of news-tr and tr-news methods : Application to nonclassical nonlinearity ultrasonic imaging. In *proc. of the IEEE Ultrasonic Symposium*, 2007.
20. T. GOURSOLLE, J. FORTINEAU, S. CALLÉ, and S. DOS SANTOS. Localized ultrasonic parametric interaction near cracked area in thin samples with nonlinear elastic wave spectroscopy-based time reversal. In *Proceedings of International Congress of Ultrasonics*, Vienna, 2007.
21. O. BOU MATAR, S. CALLÉ, T. GOURSOLLE, and S. DOS SANTOS. 3d simulations of nonlinearity based time reversal imaging of damaged materials. In *proc of the International Congress on Ultrasonics*, 2007.
22. T. GOURSOLLE, S. CALLÉ, O. BOU MATAR, and S. DOS SANTOS. Nonlinear time reversal acoustics for defect localization : numerical study of retrofocusing properties. In *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium*, pages 317–320, Vancouver, October 2006.
23. O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, S. CALLÉ, T. GOURSOLLE, S. VANAVERBEKE, and K. VAN DEN ABEELE. Simulations of nonlinearity based time reversal imaging of damaged materials. In *Proc of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing*, Berlin, 2006.
24. P.-Y. LE BAS, K. VAN DEN ABEELE, S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE, and O. BOU MATAR. Experimental analysis for nonlinear time reversal imaging of damaged materials. In *Proc of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing*, Berlin, 2006.
25. O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, J. FORTINEAU, T. GOURSOLLE, L. HAUMESSER, and F. VANDER MEULEN. Pseudo spectral simulations of elastic waves propagation in heterogeneous nonlinear hysteretic medium. In *proc of the 17th ISNA, State College, USA*, pages 95–98, 2005.
26. O. BOU MATAR, M. VILA, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER and J. FORTINEAU, T. GOURSOLLE, and S. DOS SANTOS. Nonlinear parameter measurement

- for nondestructive evaluation of solids : Calibrated phase modulation method. In *proc. of the 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA17*, Pennsylvania State University, USA, 18-21 July 2005.
27. S. DOS SANTOS, V. GUSEV, L. HAUMESSER, F. VANDER MEULEN, and O. BOU MATAR. Optimized excitation sources and velocity exact solutions for ultrasonic field propagation in a nonlinear medium with hysteretic behavior. In *Proc. of IEEE UFFC 50th Anniversary Joint Conference*, Montréal, Canada, 2004.
  28. F. VANDER MEULEN, J. FORTINEAU, L. HAUMESSE, S. DOS SANTOS, and O. BOU MATAR. Linear and nonlinear acoustic parameters measurements in plates with various moisture contents. In *Proc of the IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 50th Anniversary Joint Conference*, Montreal, Canada, 2004.
  29. O. BOU MATAR, F. VANDER MEULEN, M. VILA, S. DOS SANTOS, and L. HAUMESSER. Evaluation of the acoustic nonlinear parameter in solid plates. In *proc. of the World Congress of Ultrasonics, Paris, ISBN 2-9521105-0-6*, pages 1311–1314, 2003.
  30. O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, M. VILA, and F. VANDER MEULEN. Acoustic nonlinear parameter measurement in solid with a contact phase modulation method. In *proc of the 2002 IEEE Ultrasonic Symposium*, pages 881–884, Oct 8-11 2002.
  31. S. DOS SANTOS, P. MARÉCHAL, J.-M. GIRAULT, and F. VANDER MEULEN. *Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials*, chapter Characterization of a Moving Surface Roughness by Backscatterer Ultrasound Performed with Time-Frequency Analysis and High Order Statistics, pages 149–154. AIP, 2002.
  32. S. DOS SANTOS, P. MARÉCHAL, F. VANDER MEULEN, and M. LETHIECQ. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, volume 21, chapter Time-Frequency Analysis For Surface Roughness Characterization Using Backscatter Ultrasound, pages 752–758. AIP, 2002.
  33. O. BOU MATAR, C. ROSSIGNOL, L. PIZARRO, S. DOS SANTOS, and F. PATAT. Mapping of airborne ultrasonic fields using optical heterodyne probing and tomography reconstruction. In *proc. of the 2000 IEEE Ultrasonic Symposium*, Caribe Hilton, San Juan, Puerto Rico, Oct 22-25 2000.
  34. S. DOS SANTOS, F. TESTON, O. BOU MATAR, F. VANDER MEULEN, E. GOUIN, and M. LETHIECQ. Thermosetting smc resin characterization using linear and nonlinear ultrasonics. In *AIP Conference Proceedings*, volume 557, pages 1248–1252, 2000.
  35. M. PLANAT, S. DOS SANTOS, N. RATIER, J. CRESSON, and S. PERRINE. Close to resonance interaction of radiofrequency waves in a schottky diode mixer : 1/f noise and number theory. In P. H. Handel and A. L. Chung, editors, *Proc. of the VII Van der Ziel Symposium on Quantum 1/f Noise and other Low Frequency Fluctuations in Electronic Devices*, page 177, 1999.
  36. S. DOS SANTOS and M. PLANAT. Generic generation of 1/f noise in locked systems working in nonlinear mode. In *proc of the 1999 International IEEE Frequency Control Symposium*, page 1207, Besançon, 1999.

37. M. PLANAT, S. DOS SANTOS, J. CRESSON, and S. PERRINE.  $1/f$  frequency noise in a communication receiver and the riemann hypothesis. In C. Surya, editor, *proc. of the 15th International Conference on Noise in Physical Systems and  $1/f$  fluctuations*, page 409, 1999.
38. M. PLANAT and S. DOS SANTOS. The arithmetic of frequency mixings in an electronical loop. In *proc of the 12th European Frequency and Time Forum*, page 402, Varsovie, Pologne, 1998.
39. S. DOS SANTOS, F. LARDET-VIEUDRIN, and M. PLANAT. Nonlinearly generated  $1/f$  frequency noise in modelockings. In *proc. of the 12 Eur. Freq. and Time Forum*, page 352, Varsovie, Pologne, 1998.
40. S. DOS SANTOS, J.-F. MOUGIN, F. LARDET-VIEUDRIN, J. GROSLAMBERT, and M. PLANAT. A nonlinear approach of the spectrum and stability of frequency lockings. In *proc of the 11th European Frequency and Time Forum EFTF*, page 534, Neuchâtel, Suisse, Mars 1997.
41. M. PLANAT, S. DOS SANTOS, and F. LARDET-VIEUDRIN. Carrier to envelope resonances, quasi-periodicity and  $1/f$  frequency noise in an injection-locked oscillator. In *proc. of the IEEE International Frequency Control Symposium*, Honolulu, Hawaiï, 5-7 juin 1996.
42. F. LARDET-VIEUDRIN, G. MARTIN, S. DOS SANTOS, G. MARIANNEAU, and M. PLANAT. Frequency stability control of carrier-envelope resonance in a surface acoustic wave delay line oscillator. In *proc. of the 10th European Frequency and Time Forum EFTF*, page 416, Brighton, UK, March 1996.
43. P. MARQUIÉ, J.-M. BILBAULT, B. MICHAUX, and S. DOS SANTOS. Modulational instability in real discrete systems. In Word Scientific, editor, *Proceedings of the Euroconference : Nonlinear Klein-Gordon and Schrödinger Systems, Theory and Applications*, San Lorenzo de Escorial (Madrid), Spain, 1995.
44. P. MARQUIÉ, J.-M. BILBAULT, B. MICHAUX, and S. DOS SANTOS. Modulational instability in discrete systems. In *Conference on Nonlinear Coherent Structures in Physics and Biology*, Heriot-Watt University, Edinburgh, 1995.

#### **Communications nationales à comité de sélections avec actes (10)**

45. T. GOURSOLLE and S. DOS SANTOS. Modulation de phase dans les solides bicouches : extension de la méthode autocalibrée de mesure du paramètre non linéaire. In *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique*, pages 203–206, Tours, 2006.
46. O. BOU MATAR, S. CALLÉ, S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE, P. PERNOD, and V. PREOBRAZHENSKY. Rétro focalisation d'ondes conjuguées en phase sur un objet présentant un fort contraste de non linéarité. application au cnd. In *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique*, pages 355–358, Tours, 2006.
47. S. DOS SANTOS, B.K. CHOI, A. SUTIN, and A. SARVAZYAN. Nonlinear imaging based on time reversal acoustic focusing. In *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique*, pages 359–362, Tours, 2006.



48. S. DOS SANTOS and C. PLAG. Analyse des symétries des systèmes non linéaires : simplification des équations de propagation ; traitement du signal et méthode d'inversion de pulse à l'ordre 3. In *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique*, pages 455–458, Tours, 2006.
49. F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER, S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE, J. FORTINEAU, and L.P TRAN-HUU-HUE. Méthode expérimentale de caractérisation des non-linéarités d'un transducteur ultrasonore. In *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique*, pages 505–508, Tours, 2006.
50. L. HAUMESSER, F. VANDER MEULEN, , P. MARÉCHAL, S. DOS SANTOS, and O. BOU MATAR. Etude théorique et expérimentale de la génération du deuxième harmonique à travers une plaque immergée. In *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique*, pages 509–512, Tours, 2006.
51. S. DOS SANTOS and T. GOURSOLLE. Analyse des matériaux fissurés par focalisation ultrasonore et retournement temporel acoustique non linéaire. In *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique*, pages 633–636, Tours, 2006.
52. S. DOS SANTOS, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER, M. VILA, J. FORTINEAU, and O. BOU MATAR. Nonlinear elastic wave spectroscopy (news) measurements of the nonlinear acoustic parameter : Applications in quenched metallic samples. In *proc. of the Joint SFA-DAGA meeting*, page 723, Strasbourg, 2004.
53. S. DOS SANTOS. Symmetry of nonlinear acoustics equations using group theoretic methods : a signal processing tool for extracting judicious physical variables. In *proc. of the Joint SFA-DAGA meeting*, page 549, Strasbourg, 2004.
54. S. DOS SANTOS, M. VILA, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER, and O. BOU MATAR. Application de l'acoustique non linéaire dans le contrôle non destructif : mesure du paramètre non linéaire de la silice par une méthode de modulation de phase. In *actes de la 6ème Rencontre du Non-Linéaire*, pages 107–112, Institut H. Poincaré, Paris, 2003.

#### **Communications internationales à comité de sélections sans actes (16)**

55. T. GOURSOLLE, S. CALLÉ, S. DOS SANTOS, and O. BOU MATAR. 3d numerical study for defect detection with nonlinear elastic wave spectroscopy and time reversal techniques. In *joint international ASA-EEA-SFA symposium ACOUSTICS'08, Paris, july 2008 ; abstract in Acta Acustica, 94, Suppl. 1, p. 864., 2008.*
56. S. DOS SANTOS, A. SUTIN, and A. SARVAZIAN. Evaluation of local nonlinearity using time reversal acoustic focusing. In *joint international ASA-EEA-SFA symposium ACOUSTICS'08, Paris, july 2008 ; abstract in Acta Acustica, 94, Suppl. 1, p. 867., 2008.*
57. S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE, M. DRÁB, and T. SLUNEČKO. Chirp-coded excitation applied with advanced pulse inversion for nonlinear acoustics in complex steel samples. In *joint international ASA-EEA-SFA symposium ACOUSTICS'08, Paris, july 2008 ; abstract in Acta Acustica, 94, Suppl. 1, p. 431., 2008.*
58. L. HAUMESSER, J. FORTINEAU, D. PARENTHOINE, S. DOS SANTOS, , T. GOURSOLLE, and F. VANDER MEULEN. Ultrasonic nonlinear parameter measurement

- 
- critical investigation of experimental devices. In *2nd journées du GDR Onde, Anglet, 2-6 juin, 2008*.
  - 59. S. DOS SANTOS. Tr-news and news-tr : Imaging of elastic nonlinearity in complex structure using time reversal invariance. In *abstract in proc of the European NDT Days, Prague, Czech Republic, p. 247, 2007*.
  - 60. S. DOS SANTOS, P.-Y. LE BAS, K. VAN DEN ABEELE, T. GOURSOLLE, O. BOU MATAR, and M. DOMENJOUR. Tr-news and news-tr experiments for an imaging of the local nonlinearity in damaged aeronautic complex structure. In *Int. Congress on Acoustics, Madrid, Spain, 2-7 September, 2007*.
  - 61. T. GOURSOLLE, J. FORTINEAU, S. CALLÉ, O. BOU MATAR, and S. DOS SANTOS. Improvement of nonlinear elastic wave spectroscopy with time reversal acoustics : Numerical and experimental approach. In *12th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials (12th IWNE), Ajaccio, France, June, 2007*.
  - 62. S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE, O. BOU MATAR, and S. CALLÉ. Nonlinear time reversal : News-tr simulations and tr-news experiments. In *11th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials (11th IWNE), Sorrento, Italy, June, 2006*.
  - 63. S. DOS SANTOS and C. PLAG. Symmetry analysis : a way to find how to excite and analyze a complex system. applications for imaging the elastic nonlinear behavior of solids. In *11th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials (11th IWNE), Sorrento, Italy, June, 2006*.
  - 64. T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, F. VANDER MEULEN, and L. HAUMESSER. Contact phase modulation measurements in bilayer solids using nonlinear means. In *abstract in NDT Welding Bulletin, Vol. 2, p. 14, 2005*.
  - 65. J. FORTINEAU, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER, S. DOS SANTOS, , O. BOU MATAR, and G. FEUILLARD. étude ultrasonore de la reprise hydrique dans des résines phénoliques par des mesures linéaires et non linéaires. In *12ème Journées d'Acoustique Physique Sous-Marine et Ultrasonores, Aix, Mai, 2005*.
  - 66. S. DOS SANTOS and O. BOU MATAR. Symmetry of nonlinear acoustics equations using group theoretic methods : applications on khokhlov-zabolotskaya and hysteretic equations. In *9th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials (9th IWNE), Karlskrona, Sweden, May 31- June 4, 2004*.
  - 67. O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, L. HAUMESSER, and F. VANDER MEULEN. Phase modulation in nonlinear elastic medium. In *9th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials (9th IWNE), Karlskrona, Sweden, May 31- June 4, 2004*.
  - 68. S. DOS SANTOS and M. PLANAT. Propriétés non linéaires et arithmétiques de la synchronisation des systèmes : application aux fluctuations de basse fréquence des oscillateurs ultra-stables. In *2nde rencontre du Non-Linéaire, Institut H. Poincaré, Paris, Mars, 1999*.
  - 69. S. DOS SANTOS, F. LARDET-VIEUDRIN, and M. PLANAT. Synchronisation porteuse-enveloppe non linéaire dans un oscillateur à ondes acoustiques de surface. In *VIème Journées d'Acoustique Physique Sous-Marine et Ultrasonores, Blois, 5-6 Mai, 1999*.



70. S. DOS SANTOS, M. PLANAT, and F. LARDET-VIEUDRIN.  $1/f$  spectrum in a non-linear electronic loop : Consequences in frequency standards and signal processing. In *International Conference on Transmission and Signal Processing in Nonlinear Electronics and Optics, Dijon, 8-10 juin, 1998*.

#### Séminaires (14)

71. S. DOS SANTOS. Innovations en acoustique ultrasonore appliquées à l' aéronautique à l' ENI val de loire, 2008. séminaire au sein de THALES Avionics, Vendôme, 31 janvier 2008.
72. S. DOS SANTOS. Aéronautique à l' ENI val de loire : l'apport de la recherche en acoustique ultrasonore non linéaire, 10 mars 2008. séminaire au sein d'ASTRIUM-EADS, Bordeaux.
73. S. DOS SANTOS. Complexity of material explored with nonlinear tools : from physical concepts to image processing. ERASMUS seminar at Prague, Czech Republic, 10 mars 2007.
74. L. POURCELOT, M.DEFONTAINE, and S. DOS SANTOS. La santé des astronautes et des matériaux aéronautiques surveillée par ultrasons. conférence dans le cadre de la Fête de la Science, Lycée Descartes, Tours, 9 octobre 2007.
75. S. DOS SANTOS. Symmetry analysis and its applications for imaging the elastic nonlinear behavior of complex materials. séminaire au Center for Nonlinear Studies (CENS) at Institute of Cybernetics, Tallinn Technical University, 11 dec 2006.
76. S. DOS SANTOS. Caractérisation non linéaire des matériaux dégradés : Modélisation des non-linéarités "non classiques" (PM-space), traitement du système par "analyse des symétries", et expérimentation ultrasonore par retournement temporel. séminaire au Laboratoire Ultrasons Signaux et Instrumentation (LUSSI CNRS), Université de Tours, 18 mai 2005.
77. S. DOS SANTOS. Contact pulse-echo method for nonlinearity measurements of solids via phase modulation method : Calibration, limitation and future trends. séminaire invité à School of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham, 19 sept 2005.
78. S. DOS SANTOS. Intérêt de la nonlinéarité pour la caractérisation des matériaux et des milieux biologiques : Applications et problématiques. séminaire au Laboratoire d'Acoustique du Mans, Février 2004.
79. S. DOS SANTOS. La nonlinéarité hystérétique des matériaux et ses applications dans le projet aeronews. séminaire au Laboratoire Ultrasons Signaux et Instrumentation (LUSSI CNRS), EIVL, 17 novembre 2004.
80. S. DOS SANTOS. Méthodes algébriques pour un traitement du signal adapté à l'acoustique non linéaire : application au contrôle non destructif en aéronautique. séminaire invité au Laboratoire de Mathématique et Physique Théorique de l'Université de Tours, 25 Novembre 2004.
81. S. DOS SANTOS. Acoustique non linéaire et instrumentation pour la caractérisation ultrasonore des matériaux micro-inhomogènes. séminaire à l'Institut FEMTO, Besançon, 29 avril 2004.

82. S. DOS SANTOS. Le traitement du signal dans les sciences du non linéaire : de l'étude du bruit en  $1/f$  à la caractérisation des matériaux ; théorie, résultats et perspectives. séminaire au Laboratoire d'Étude des Systèmes Informatiques et Automatiques (LESIA) de l'INSA de Toulouse, mai 2002.
83. S. DOS SANTOS. Propriétés de l'acoustique non linéaire pour la détection de défauts dans les matériaux. séminaire au Laboratoire d'Acoustique du Mans, Octobre 2000.
84. S. DOS SANTOS. Synchronisation d'oscillateurs dans une boucle électronique. exposé dans le cadre du groupe "Interaction Homme-Temps" de l'Université de Franche-Comté, mai 1998.



## **Deuxième partie**

### **Synthèse de l'activité de Recherche**



# Principales notations

## Notations générales

$p$  : pression acoustique instantanée dans le milieu  
 $P_0$  : pression acoustique dans le milieu au repos

$s$  : entropie due à la perturbation acoustique  
 $s_0$  : entropie au repos  
 $s'$  : variation d'entropie du milieu

$t$  : temps

$T$  : température instantanée  
 $T_0$  : température du milieu au repos  
 $T'$  : variation de température du milieu

$v'$  : variation de vitesse particulière

$c_0$  : célérité de l'onde acoustique à l'équilibre

## Symboles

$\Delta$  : opérateur décrivant la variation  
 $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla$  : dérivée temporelle matricielle (ou dérivée Lagrangienne)  
 $\nabla \cdot$  : opérateur gradient  
 $\nabla^2$  : opérateur Laplacien  
 $\delta(x)$  : fonction de Dirac



# Introduction

L'exploration ultrasonore des milieux complexes, comme les milieux biologiques et mésoscopiques nécessite des systèmes d'instrumentation de plus en plus élaborés, dans lesquels tout les aspects techniques (de l'excitation à la mesure) sont sans cesse améliorés. C'est le cas du système excitation et de génération des signaux avec les systèmes multivoies utilisant la formation de faisceaux, le codage ou le retournement temporel par exemple. C'est le cas aussi des méthodes de mesure et de détection (comme l'interférométrie ou la microscopie laser) qui doivent être de plus en plus précises, de plus en plus large bande, mais aussi de plus en plus exactes et étalonnées, surtout pour des mesures utilisant et exploitant la nonlinéarité des milieux. Aussi, et afin de suivre cette progression technique et instrumentale, les techniques de traitement du signal et de l'image doivent-elles également progresser afin d'optimiser et d'extraire cette nouvelle information désormais accessible. Ces différents aspects ne peuvent évoluer séparément et il devient nécessaire de les aborder avec une approche systémique, c'est-à-dire en modélisant l'ensemble du système, partant de l'excitation jusqu'à la mesure. C'est exactement dans cet esprit que doivent d'ailleurs se placer toutes les mesures exploitant la nonlinéarité acoustique, puisque celles-ci nécessitent obligatoirement une étape d'étalonnage. Cette étape n'était pas nécessaire lorsque l'on considérait les systèmes linéaires, puisque chaque étape pouvait être décomposée et toute la chaîne était explorée partie par partie en utilisant la proportionnalité des réponses. L'analyse fréquentielle était en outre, la méthode d'analyse des systèmes linéaires qui permettait d'extraire cette information. L'analyse des systèmes non linéaires devient alors extrêmement plus complexe si la modélisation du système à explorer doit comporter également la prise en compte des systèmes d'excitation et de mesure. Il est donc nécessaire de disposer d'une méthode systématique de simplification des équations non linéaires pouvant être couplées et comporter des termes non classiques, comme les phénomènes d'hystérésis ou de mémoire. C'est exactement ce que peuvent proposer les méthodes d'analyse des systèmes non linéaires utilisant les symétries de Lie. Cette méthode permet d'extraire des changements de variables liés aux propriétés de symétrie du système physique. De plus, ces changements de variables peuvent être optimisés en déterminant des conditions *a priori* sur les signaux d'excitation. Il existe même des situations où cette procédure peut conduire à des solutions mathématiques exactes du problème. C'est dans ce cadre que se situe cette recherche.





# Chapitre 1

## Instrumentation ultrasonore pour l'acoustique non linéaire

### 1.1 Introduction

L'imagerie ultrasonore des milieux complexes ne cesse de progresser et permet des avancées remarquables dans les domaines aussi variés du monde de l'imagerie médicale et du milieu industriel. Les plus belles avancées se situent au niveau de la qualité des images résultant d'une augmentation significative de la résolution et de la précision des mesures. Dans le contexte très spécifique du Contrôle Non Destructif (CND), l'utilisation des ultrasons comme technique d'investigation pourrait présenter un certain nombre de limitations. En effet, d'autres techniques, héritées de l'imagerie médicale, pourraient prétendre remplacer les méthodes de caractérisation ultrasonore dans la mesure où ces dernières présentent un certain nombre de limitations dans le cas de nouvelles problématiques industrielles de CND : nouveaux matériaux composites, structure à géométrie complexe, contrainte de Structural Health Monitoring (SHM), montée en fréquence des nouveaux dispositifs. L'une des principales limitations de ces méthodes ultrasonores conventionnelles est la limite basse de l'échelle explorée par les ultrasons qui reste de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Par analogie aux problématiques du milieu médical où les méthodes ont exploré d'autres potentialités, il est apparu envisageable de s'inspirer des progrès de l'imagerie ultrasonore médicale et de l'adapter dans le domaine du CND. C'est ainsi qu'une communauté scientifique s'est développée depuis 1998 autour de l'utilisation d'une imagerie harmonique, appliquée au CND, des milieux solides complexes avec une application qui sortirait du cadre des applications médicales.

Parallèlement, l'évolution technologique de l'instrumentation ultrasonore permet d'explorer des champs d'applications non accessibles auparavant. C'est au travers des progrès réalisés en terme de transduction ultrasonore, mais aussi de modélisation et

traitement des signaux, que la sensibilité des mesures ultrasonores a permis d'explorer des contributions ultrasonores constituant des termes considérés auparavant comme du bruit de mesure : les termes non linéaires appelés harmoniques, et qui constituent le cœur de l'imagerie harmonique désormais présente dans tout échographe standard.

La nécessité pour le LUSI d'apporter sa contribution dans ce domaine de l'imagerie ultrasonore a conduit tout naturellement, et compte tenu de l'opportunité proposée au sein de l'EIVL, à la mise en place, avec Olivier Bou Matar, d'une nouvelle thématique intitulée "Caractérisation Ultrasonore des Matériaux par Acoustique Non Linéaire" au sein de l'équipe "Interaction Ultrasons-Matière", animée par Jean-Pierre Remeniéras et Olivier Bou Matar. L'objectif de cette équipe[13, p. 83] est de mesurer le paramètre non linéaire  $\beta$  dans les agents de contraste et de traiter les applications médicales sur le site de Tours, et les applications CND sur le site de Blois (mesure du paramètre non linéaire  $\beta$  d'échantillons solides de faible épaisseur).

## 1.2 Stratégie scientifique

### 1.2.1 Mise en place de la stratégie de recherche

La démarche scientifique à la base de cette thématique développée au sein du LUSI à Blois s'appuyait justement sur la volonté de créer, au sein de la structure d'enseignement de l'EIVL possédant une mission industrielle forte, une thématique de recherche avec des applications industrielles pour priorité principale. C'est ainsi que mon projet de recherche a été défini dans la mise en place d'une approche expérimentale et théorique de la caractérisation de la fatigue des matériaux et des fissures par acoustique non linéaire, approche publiée par l'équipe de Nagy en 1998[115], et qui, selon mes connaissances initiées dès 1995 en physique non linéaire et la formation que j'ai pu acquérir au cours de mon travail de Thèse de Doctorat, présentait un potentiel sans doute équivalent à ce qui existait déjà dans les milieux biologiques généralement considérés comme des fluides.

### 1.2.2 Évaluation de la potentialité de l'approche

L'approche proposée s'appuie sur une base de résultats alors extrêmement prometteurs dans d'autres domaines scientifiques. L'acoustique non linéaire est un vecteur d'innovation et de progrès dans l'imagerie médicale. L'optique non linéaire permet une augmentation du flux de données dans les télécommunications. Les principales fonctions de l'électronique exploitent la nonlinéarité des composants (diodes, transistors, circuits logiques, triggers, etc.).

Dans le domaine de l'acoustique non linéaire des solides, les modèles et les phénomènes sont connus depuis fort longtemps ; les signatures restaient toutefois trop négligeables pour être observées, traitées et correctement exploitées. Les progrès de l'instrumentation devaient permettre de progresser dans ce domaine ce qui a été correctement réalisable avec les nouveaux dispositifs électroniques. C'est aussi une des raisons qui donne à cette approche un intérêt en terme d'instrumentation. L'exploration expérimentale des effets non linéaires est alors un vecteur de progrès et est potentiellement source d'innovation technologique, surtout au niveau de la qualité de l'instrumentation et de la rigueur de la métrologie.

Enfin, la dernière potentialité de cette approche concerne un domaine plutôt en marge des activités principales du LUSSI même si elles peuvent toutefois élargir dans la catégorie " Sciences des Systèmes Complexes ". La modélisation et la représentation des systèmes non linéaires peuvent alors être considérées comme relevant d'une discipline avancée du traitement du signal et des systèmes. De nombreuses connexions existent désormais entre ces disciplines et elles sont susceptibles de générer des résultats pouvant conduire à une innovation.

### 1.3 Thématique de recherche et objectifs

La thématique de recherche développée explore les méthodes de caractérisation ultrasonore de la dégradation précoce des matériaux solides complexes par l'utilisation des effets non linéaires de la propagation acoustique (Figure 1). Le fait d'utiliser les harmoniques (plus haute fréquence) plutôt que le fondamental permet d'avoir une caractérisation sub-lambda, en deçà de la longueur d'onde  $\lambda$ . Ce thème s'inscrit ainsi dans le champ de compétence du LUSSI en terme de caractérisation ultrasonore et me permettait de mettre à profit l'expérience de métrologie fine et d'instrumentation acquise et développée au LPMO-CNRS à Besançon. La dégradation des propriétés structurelles des matériaux est issue des mécanismes physiques complexes de fissures et dislocation possédant des propriétés multi-échelles et mettant en jeu des forces moléculaires possédant des comportements appelés " non classiques " générant des termes non linéaires qu'il était nécessaire d'exploiter. L'utilisation des phénomènes de propagation acoustique et d'interaction d'ondes dans les solides a été privilégié dans la mesure où celles-ci se révèlent plus propices dans un but d'imagerie échographique. Les méthodes exploitant les résonances ont plutôt été écartées du fait de la difficulté à relier les propriétés des systèmes résonants aux paramètres locaux que pourrait posséder une région localement dégradée d'un matériau. Enfin cette approche doit pouvoir s'appliquer au cas très concret du CND, où les mesures doivent être auto-référencées dans la mesure du possible, où les structures à analyser peuvent être difficiles d'accès, et où la géométrie et les propriétés structurelles ne sont pas forcément homogènes et très bien connues, comme c'est le cas des composites de l'industrie aéronautique fortement étudiés en ce moment. Afin de faire le tour des conditions nécessaires à la conduite de cette approche, plusieurs pistes ont été explorées.

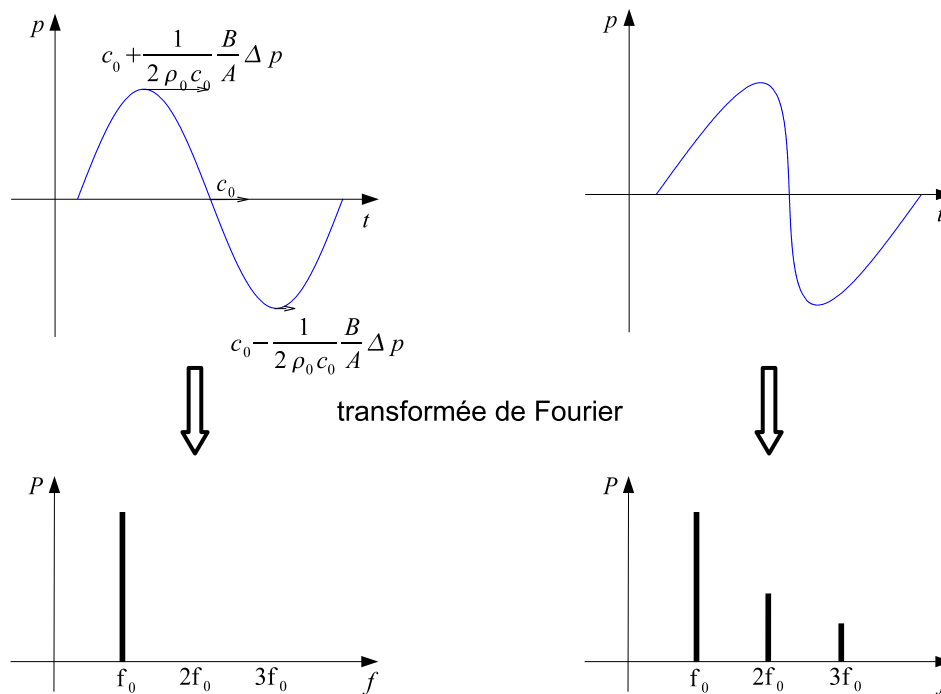


Figure 1 – Distorsion du profil d'une onde acoustique lors de sa propagation dans un milieu non linéaire (excitation initiale à gauche et finale à droite), et son enrichissement spectral associé (création d'harmoniques)

### 1.3.1 Projet de recherche initial

Dans ce contexte bien défini, mon projet de recherche initialement établi se définissait littéralement par :

Contrôle non destructif, caractérisation des matériaux, échographie médicale font partie des applications récentes de l'utilisation des ultrasons dans les milieux non linéaires et demeurent une thématique de recherche très forte et un pôle de compétence au sein du LUSI. En effet, pour un diagnostic non destructif des matériaux tels les polymères ou les composites, les ondes ultrasonores se révèlent d'une grande puissance compte tenu du fait que les caractéristiques de propagation des ultrasons sont directement reliées aux propriétés des matériaux. Le phénomène de dégradation des matériaux est alors souvent précédé d'un comportement mécanique non linéaire provenant de la présence de micro-fissures et pour lesquelles une localisation d'énergie est observée. L'ultime état de solidité se révèle par la présence d'imperfections microscopiques jouant le rôle de germe dans le processus de fracture. Étant donné la faible taille de ces germes (par rapport à la longueur d'onde acoustique), l'expérience montre que les paramètres acoustiques non linéaires constituent des indicateurs de fatigue plus fiables que leurs équivalents linéaires (atténuation, vitesse, etc.). Le projet de recherche proposé consiste à utiliser une compétence en physique non linéaire acquise dès le DEA, lequel traitait des phénomènes d'instabilité modulationnelle dans les vibrations moléculaires pour lesquelles la localisation d'énergie était la principale conséquence. De plus l'expérience acquise au cours

de la Thèse en matière d'instrumentation électronique, de métrologie des fréquences (bancs de mesure, commande automatique d'asservissement) et de traitement du signal (caractérisations statistiques et spectrales des signaux) sera alors tout à fait adaptée aux besoins en instrumentation ultrasonore du site Blésois du LUSI. Enfin, l'expérience acquise en matière de modélisation des systèmes non linéaires sera mise à profit.

### 1.3.2 Une instrumentation ultrasonore spécifique

Le choix de travailler en exploitant les phénomènes de propagation d'ondes nécessite le développement d'une instrumentation exploitant les progrès et les performances des systèmes d'échographie médicale en terme d'échographie impulsion/réception. Si on analyse les progrès réalisés en échographie, ils sont liés à la montée en fréquence des systèmes ultrasonores. Aujourd'hui, pour des besoins en directivité, pour des applications en micro-électronique ou en imagerie du petit animal, il est désormais nécessaire d'avoir recourt à des systèmes fonctionnant vers 40 MHz, domaine des hautes fréquences ultrasonores. Devant cette réalité de montée en fréquence, les phénomènes d'atténuation conduisent à une prise en compte du moyen efficace d'appliquer des niveaux d'excitation plus importants, nécessitant également la prise en compte des effets non linéaires.

Devant la très grande difficulté de disposer de matériaux aux propriétés non linéaires bien connues, la nécessité de développer des méthodes auto-référencées se révélaient également indispensable.

## 1.4 Mesures globales par conversion de fréquences

### 1.4.1 Premières expériences au LUSI

Les résultats alors prometteurs pour caractériser précocement la dégradation et la fatigue des matériaux par l'analyse des effets acoustiques non linéaires étaient ceux de Nagy sur des échantillons industriels[115]. Ils ont servi de base de départ. Dans le but de mesurer le paramètre non linéaire  $\beta$ , la première mesure fut celle de la génération d'harmoniques (Eq.II.2.54).

Les premières expériences réalisées au LUSI dans le cadre du projet NUCAM ont été faites sur des matériaux complexes très atténuants ( $\alpha(f)=-8\text{dB/mm @ } 2.25\text{ MHz}$ ) constituant la base des matériaux thermo-durcissables utilisés dans l'industrie aéronautique. Ces expériences ont été implantées sur le nouveau site de l'EIVL début 1999 en collaboration avec Olivier Bou Matar, Franck Teston et Émilie Gouin.

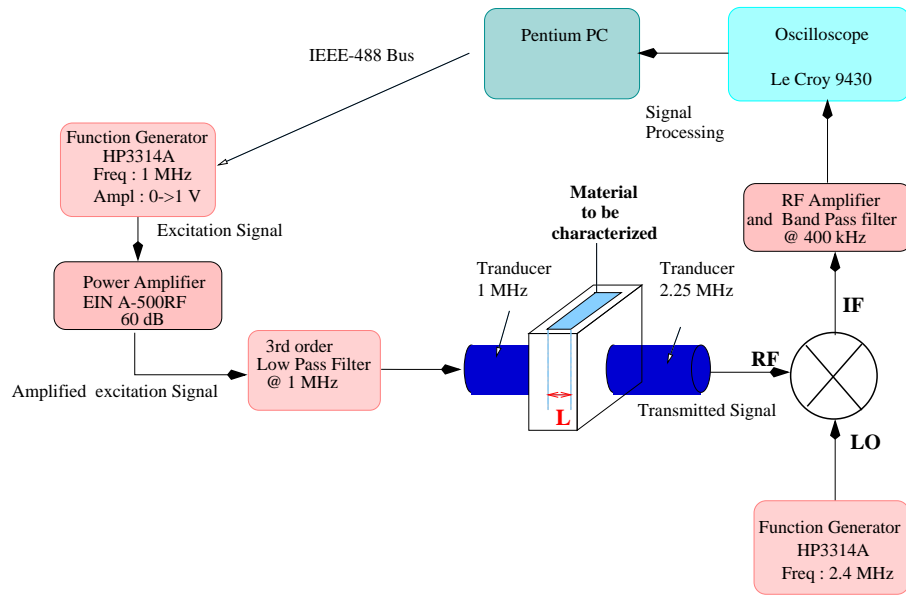


Figure 2 – Dispositif expérimental hétérodyne de mesure de l'harmonique 2 dans les résines thermodurcissables

Le dispositif expérimental[50] est présenté en figure 2 où la méthode de conversion de fréquence utilisée exploitait les résultats obtenus lors de mon travail de Thèse de Doctorat sur les mélanges de fréquences. En effet, la mesure de l'harmonique  $f_2 = 2\text{MHz}$  s'effectue avec un transducteur de 2.25 MHz de fréquence centrale. Ce signal RF était ensuite mélangé dans un mélangeur équilibré afin d'effectuer une détection hétérodyne à  $f_{ref} - f_2 = 400\text{ kHz}$  provenant du mélange avec un oscillateur de référence stabilisé à  $f_{ref} = 2.4\text{ MHz}$ . Cette conversion de fréquence permettait une mesure plus précise compte tenu des systèmes d'acquisition numériques alors disponibles. Ces mesures présentaient l'essentiel des problématiques de caractérisation non linéaire des milieux complexes :

- nécessité d'un étalonnage de l'amplitude des ondes acoustiques se propageant dans les milieux à analyser
- recherche d'une optimisation de l'amplitude d'excitation des systèmes à analyser (par l'intermédiaire de la recherche du minimum d'atténuation (Figure 3))
- non-stationnarité des milieux complexes confirmée par la dépendance temporelle du minimum d'atténuation (signature d'un comportement lentement variable)
- difficulté de mesure absolue de l'harmonique deux : les mesures relatives étant toutefois possibles si l'on s'assurait de la non-variation de la composante fondamentale ( $p_0$  dans l'équation II.2.54)

Cette étude a montré qu'il était difficile de mesurer de façon absolue le paramètre non linéaire dans un milieu de faible épaisseur et très atténuant. La nécessité de disposer d'une référence fondamentale d'amplitude bien déterminée a conduit à opter pour une approche utilisant les interactions d'ondes dans les milieux.

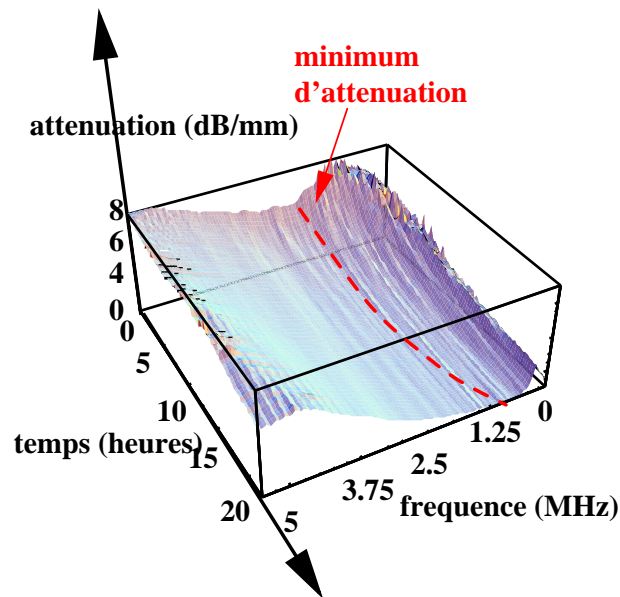


Figure 3 – Approche temps-fréquence de caractérisation de matériaux complexes : évolution de l'atténuation  $\alpha(f)$  en fonction du temps pour les résines 53-34L ( $\text{CaCO}_3$  (25 %) + styrène )

### 1.4.2 Mesures globales par interactions d'ondes

Dans le secteur aéronautique par exemple, le contrôle non destructif (CND) des pièces exige des méthodes de plus en plus fiables et précises sur des matériaux de plus en plus complexes (composites) dans lesquels se produisent des phénomènes physiques micro voir nanoscopiques (adhésion, délamination, micro-cracks, etc.). C'est dans ce contexte technologique que se trouvent les limites du CND utilisant les méthodes linéaires de la spectroscopie acoustique (au demeurant de bonne qualité et pratique à mettre en œuvre).

Devant la difficulté liée à la métrologie de la mesure de la génération d'harmoniques, le choix s'est alors porté sur les méthodes d'interactions d'ondes (interactions paramétriques, modulations de phase). Le mélange des fréquences ne doit plus se faire au niveau de la mesure, mais au niveau du matériau à analyser.

Deux objectifs se sont alors imposés :

- mesure absolue du paramètre non linéaire  $\beta$
- mesures en contact car les méthodes d'insertion/substitution présentent trop de contraintes pour la mesure de la nonlinéarité des solides, compte tenu de l'importance de la nonlinéarité de l'eau[71]
- automatisation en vue d'applications d'imagerie CND

C'est ainsi que l'on a exploité les méthodes d'interactions paramétriques des ondes acoustiques (cf partie 2.5.2).



### 1.4.3 Méthode globale de modulation de phase

La première instrumentation (Figure 4) permettant de mesurer de façon absolue le coefficient non linéaire  $\beta = -6$  de la silice avec une méthode auto-calibrée en contact est le principal résultat du projet NUCAM. Elle a été présentée pour la première fois à IEEE 2002[17] et a constitué le cœur de la Thèse de Doctorat de Michel Vila[53, 136].

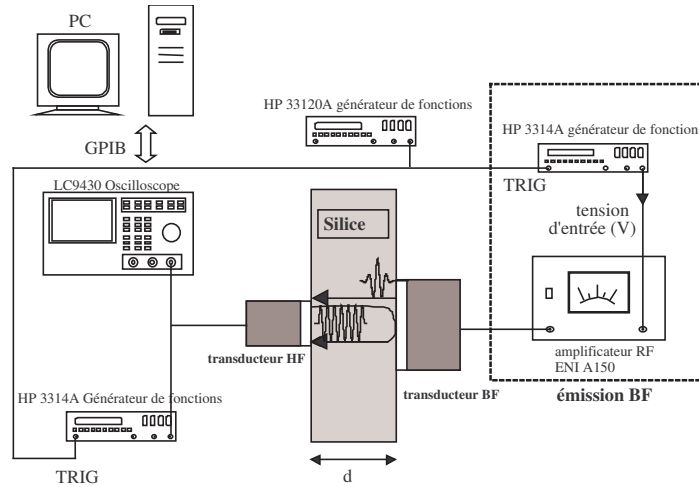


Figure 4 – Dispositif expérimental de mesure en contact du paramètre non linéaire  $\beta$  par modulation de phase[17]

Afin de valider les étapes de mesure du paramètre  $\beta$ , la mise en place de la métrologie laser par interférométrie hétérodyne, d'une électronique de synchronisation permettant de paramétrer temporellement l'émission des ondes BF et HF (Figure 5) et enfin d'une procédure de traitement du signal par démodulation numérique (avec évaluation du bruit de phase) a été nécessaire (Figure 6).

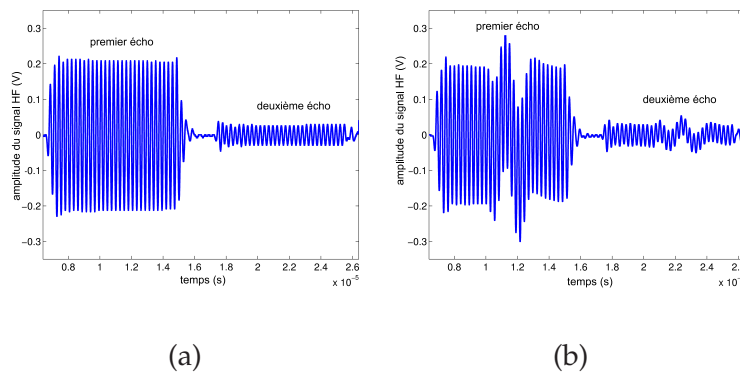


Figure 5 – Évolution temporelle du signal de sonde HF sans (a) et avec (b) superposition du signal pompe générant la nonlinéarité par interaction paramétrique

Cette nouvelle méthode de contrôle non destructif de mesure du paramètre non linéaire de la silice pure est basée sur une idée développée par Barrière et Royer [8].

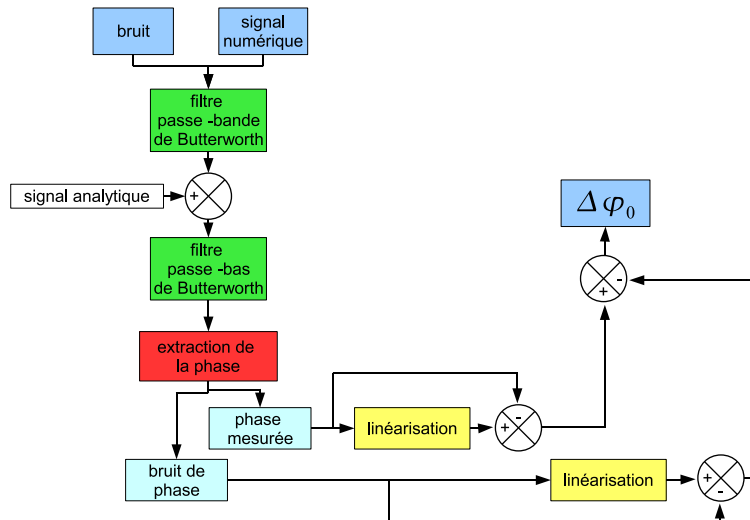


Figure 6 – Organigramme de l'algorithme de démodulation de phase numérique.

Cette méthode exploite l'interaction paramétrique entre deux ondes acoustiques ultrasonores : une haute fréquence (HF) sonde à 20 MHz et une basse fréquence (BF) à 2.5 MHz (pompe). La mesure de la nonlinéarité  $\beta$  (Eq.(II.2.63)) de l'échantillon de silice est réalisée par une mesure en contact de la modulation de phase engendrée par l'interaction paramétrique et par l'étalonnage de la vitesse particulière de la BF par une méthode de réciprocité, préalablement validée par une mesure avec un hydrophone à membrane (Figure 7).

Aussi, afin d'effectuer une détection précoce de la fatigue dans les matériaux, des résultats théoriques et expérimentaux ont montré que le paramètre de nonlinéarité  $\beta$  du matériau permettait une observation et une détection plus précoce de la dégradation de ce matériau [115]. Ce paramètre  $\beta$  est relatif au comportement non linéaire du matériau (ou du fluide) vis-à-vis de la propagation d'une onde ultrasonore. La caractérisation d'un matériau par son paramètre  $\beta$  semble donc d'un intérêt primordial dans un contexte de CND.

Cependant, compte tenu de la faible nonlinéarité des matériaux et de la difficulté de la mesure, il est nécessaire de mettre en place des expériences permettant non seulement une mesure absolue et autocalibrée du  $\beta$ .

#### 1.4.4 Étalonnage du transducteur BF en contact

Dans le but de mesurer la vitesse particulière  $v_{bf}$  (Eq.II.2.63), une méthode expérimentale d'étalonnage utilisant le principe d'auto-réciprocité [26] a été utilisée (Figure 7). En utilisant les notations de [54, 80], le spectre de vitesse particulière  $v_{bf}(f)$  est

donné par  $v_{bf}(f) = I_{out}(f)H_v(f)$  où

$$H_v(f) = \sqrt{-\frac{1}{2AZ_0D(f)} \frac{V_{in}(f) - \frac{V_{out}(f)}{I_{out}(f)}I_{in}(f)}{I_{out}(f)}}} \quad (\text{II.1.1})$$

est la fonction de transfert du transducteur,  $A$  le rayon effectif du transducteur,  $Z_0$  l'impédance acoustique du matériaux,  $D(f)$  la correction de diffraction [80] et  $V_{in}(f)$ ,  $I_{in}(f)$ ,  $V_{out}(f)$  et  $I_{out}(f)$  les spectres des courants et tensions entrant et sortant du transducteur BF (Figure 7). La vitesse particulière  $v_{bf}$  dans le domaine temporel s'obtient alors par une transformation de Fourier inverse.

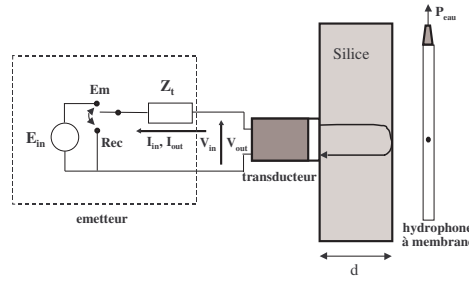


Figure 7 – Schéma de principe de l'étalonnage d'un transducteur par auto-réciprocité.

Un transducteur de 2.5 MHz ( $A = 0.75''$ ) est placé en contact avec l'échantillon de silice et excité par une impulsion BF délivrée par un système émetteur constitué d'un générateur HP 3314A et amplifié par un amplificateur ENI A150. Des sondes de courant et de tension permettent de mesurer les impulsions d'émission  $V_{in}$  et  $I_{in}$  et ceux de l'écho de réception  $V_{out}$  et  $I_{out}$ . En utilisant le principe décrit précédemment, la vitesse  $v_{bf}$  est alors calculée et comparée aux mesures absolues avec l'hydrophone à membrane.

Les courbes présentées en figure 8 valident la méthode d'auto-réciprocité malgré la présence d'une onde de bord détectée par l'hydrophone mais moyennée par le transducteur dans la méthode d'auto-réciprocité.

Le transducteur BF est étalonné *in situ* avec son électronique d'amplification. On obtient alors une relation (Figure 9a) entre  $\Delta\Phi$ , extrait par un algorithme de démodulation numérique de phase, et  $\Delta v_{bf}$  mesuré à partir de l'étalonnage. Le rapport recherché  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta v_{bf}}$  est alors extrait par un ajustement linéaire des mesures réalisées pour chaque tension (Figure 9b). Finalement en utilisant l'équation II.2.63, les paramètres géométriques et acoustiques de la silice ( $c_0 = 6000$  m/s,  $\rho_0 = 2200$  kg/m<sup>3</sup>), on évalue le paramètre  $\beta$  de la silice à  $\beta = -6.0 \pm 0.3$ . Cette valeur, conforme aux valeurs expérimentales précédemment établies dans la littérature, est de surcroît évaluée avec son signe négatif provenant de la différence de polarité des courbes  $\Delta\Phi$  et  $\Delta v_{bf}$  [135, 136].

La principale perspective de cette étude est une application directe de cette méthode à la mesure sur site industriel du paramètre non linéaire. Cette expérience pourrait

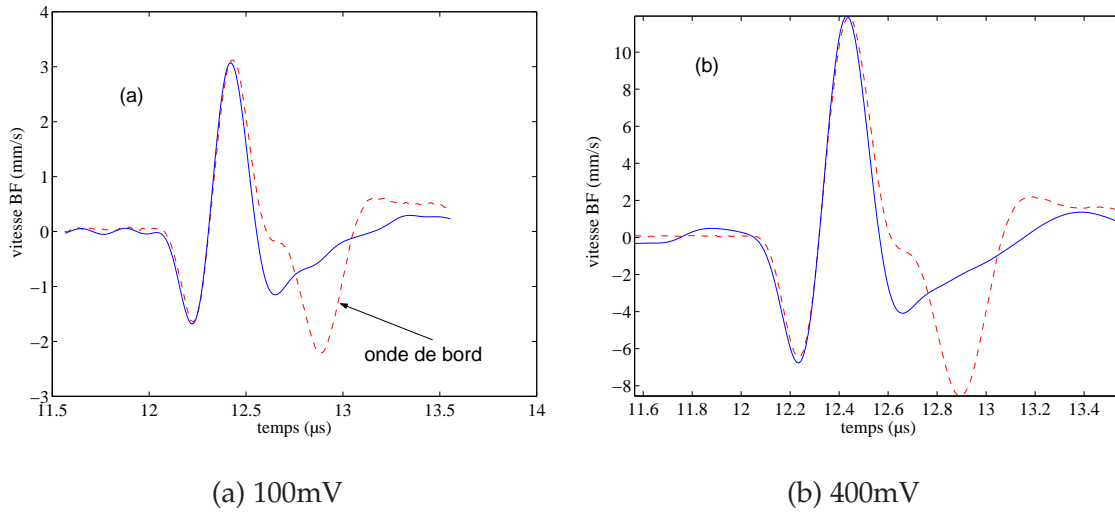


Figure 8 – Étalonnage de la vitesse de l'onde BF mesurée par auto-réciprocité (trait plein) et celle mesurée par un hydrophone à membrane (trait pointillé) pour différentes valeurs de la tension d'entrée  $V$  de l'émission BF ((a) :  $V = 100 \text{ mV}$  ; (b) :  $V = 400 \text{ mV}$ )

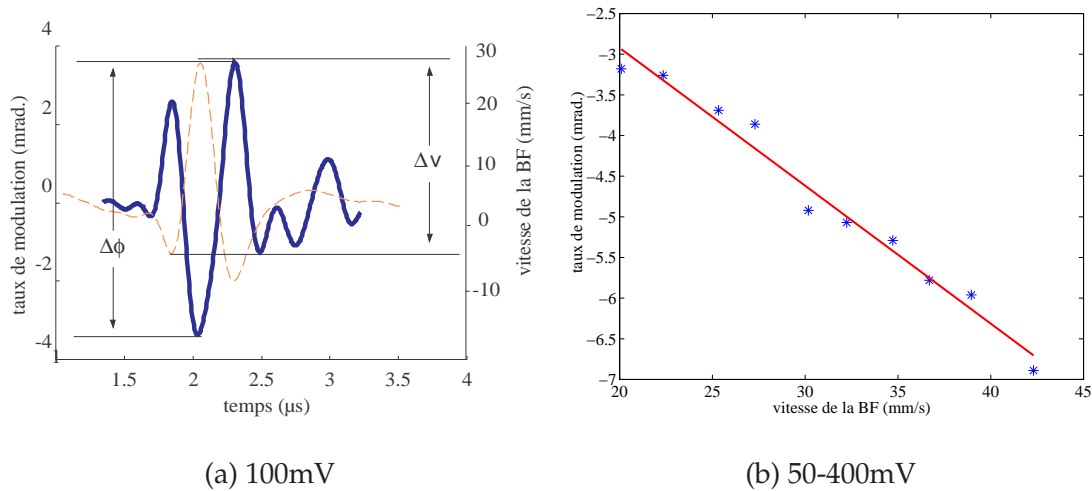


Figure 9 – (a) : Taux de modulation de phase extrait de l'onde HF (trait plein), et vitesse particulière de l'onde BF (trait pointillé). La polarité opposée des deux courbes rend compte du signe négatif du paramètre non linéaire de la silice. (b) Taux de modulation de phase en fonction de l'amplitude de vitesse de l'onde BF. La pente de la droite d'ajustement est proportionnelle à  $\beta$

être utilisée *in situ* sur des pièces à contrôler. Une bonne caractérisation du paramètre  $\beta$  ouvre la perspective d'un suivi de "taux de nonlinéarité globale dans un matériau" souvent lié à son vieillissement et à sa dégradation.

### 1.4.5 Limites de la méthode de modulation de phase

Cette expérience de caractérisation non linéaire a été validée dans un échantillon de silice pure de géométrie cylindrique mais nécessite une série de manipulations délicates et est, de ce fait, difficilement transposable dans l'industrie du CND et au cas très concret des matériaux complexes multicouches et fissurés. La première partie de la Thèse de Doctorat de Thomas Goursolle a d'ailleurs montré que cette méthode frôlait la limite de validité dans le cas de matériaux de faible épaisseur et possédant des ruptures d'impédance acoustique. Les niveaux d'excitation ultrasonore nécessaires devenaient trop importants pour rester dans le cadre des hypothèses de l'interaction paramétrique acoustique en ondes planes (cf partie 2.5.1).

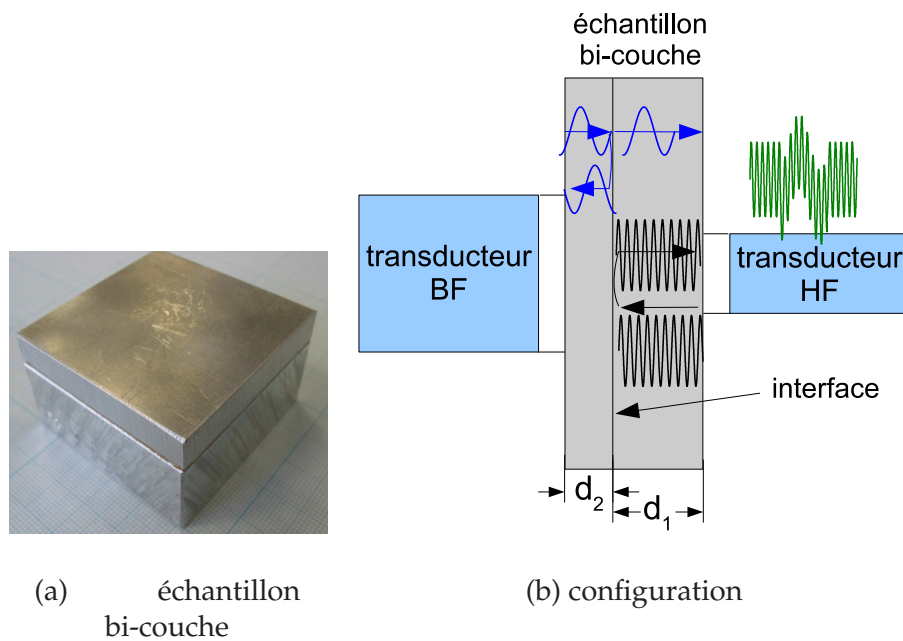


Figure 10 – Schéma de principe de la mesure du paramètre non linéaire des échantillons bi-couches par une méthode de modulation de phase en contact

Enfin, comme le calcul du paramètre non linéaire exploite l'effet cumulatif de l'interaction paramétrique, l'information extraite ne peut être que globale sur l'épaisseur de l'échantillon analysé, ce qui contraint une complexification de l'instrumentation ou un traitement des données si l'on souhaite en extraire, par reconstruction tomographique par exemple, une information locale d'une zone éventuellement fissurée ou dégradée.

C'est par l'étude d'un échantillon bi-couche (Figure 10) que l'on a évaluée les limites de la méthode de modulation de phase. Malgré l'amélioration métrologique (Figure 11) en terme d'instrumentation (dispositif à comparer avec la figure 4), le niveau de modulation restait trop proche du niveau de bruit pour pouvoir envisager mesure du coefficient non linéaire dans des matériaux complexes[57]. Parallèlement, la com-

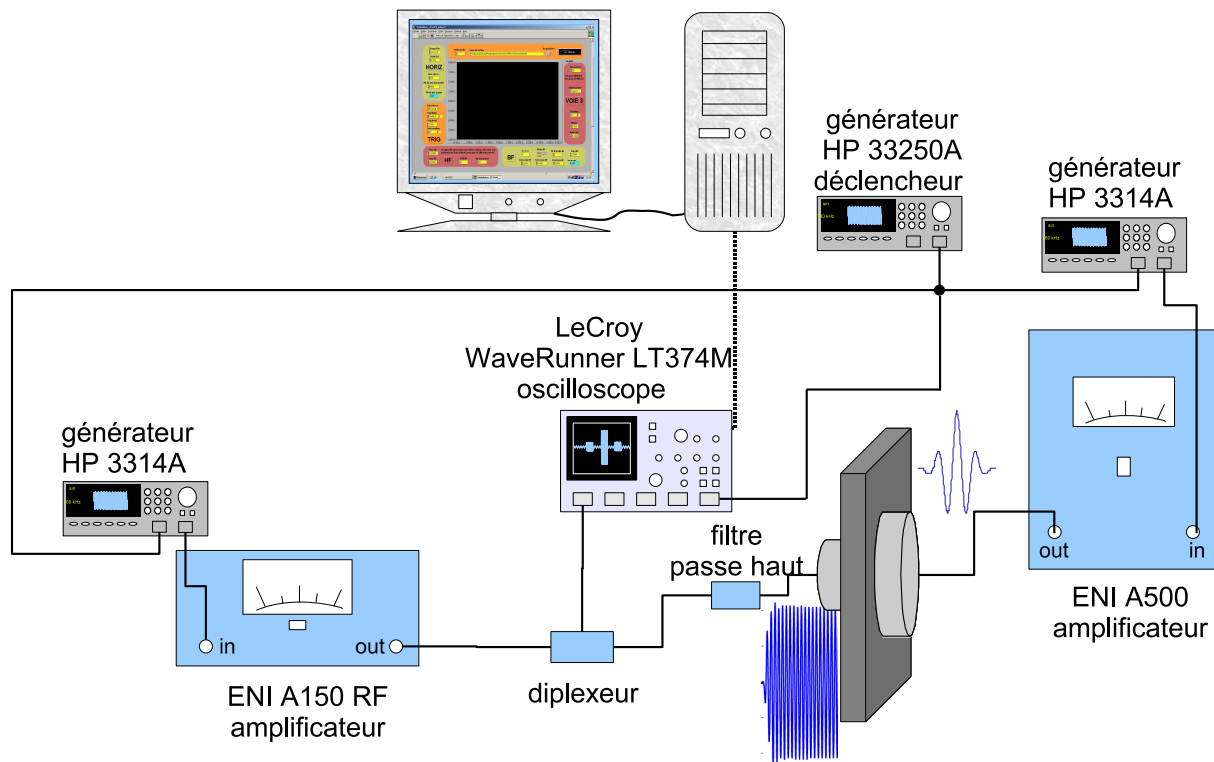


Figure 11 – *Dispositif expérimental pour la mesure du coefficient non linéaire par modulation de phase en contact.*

préhension des phénomènes hystérétiques des matériaux fissurés nous a poussé, dans le cadre du stage de Master de Thomas Goursolle, à tester des verres fissurés par la méthode de modulation de phase. La complexité des phénomènes en jeu et l'importance des phénomènes d'atténuation dans l'interaction paramétrique (négligé dans le cas de la silice) liés à la dissipation associée à la présence de l'hystérésis (figure 12) ont été confirmés par des résultats numériques[16]. Les limites de la modulation de phase sont, dans ce cas :

- prise en compte des corrections de diffraction dans l'interaction paramétrique
- niveau de modulation proche du niveau de bruit ( $\simeq 4$  mrad)
- problème de l'épaisseur des échantillons
- nécessité d'utiliser des amplificateurs large bande pour avoir des temps de réponse plus petits

## 1.5 Mesures locales par focalisation ultrasonore

Devant la difficulté à pouvoir envoyer de l'énergie ultrasonore dans le milieu solide à explorer, j'ai choisi de m'orienter vers des techniques de focalisations acoustiques. Les sondes multi-éléments CND apportaient cette possibilité, mais l'objectif de mesure localisée de la non-linéarité était un obstacle important. L'obtention d'un paramètre non linéaire local semble incompatible avec la nonlinéarité cumulative mesurée avec

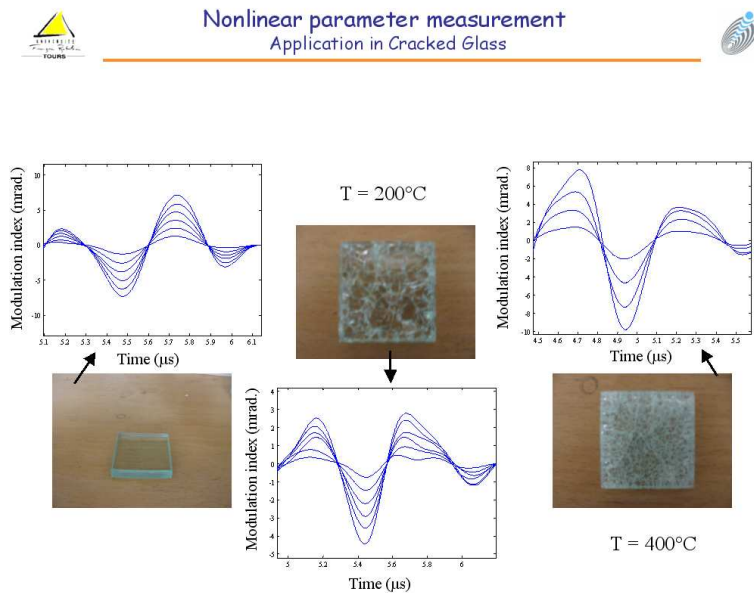


Figure 12 – *Limites de la méthode de modulation de phase*[65]

le paramètre non linéaire classique  $\beta$ . L'analyse fonctionnelle était la suivante :

- focaliser les ondes acoustiques
- tester une technique de focalisation efficace dans les milieux biologiques : le retournement temporel
- problème : instrumentation lourde et non disponible au LUSI
- idée : présentation de Anthony Puckett à QNDE 2001[98] sur la possibilité de focalisation par "retournement temporel symétrique" utilisant le principe de réciprocité entre émetteur et récepteur
- instrumentation disponible au LUSI si l'on choisi un laser en tant que récepteur

C'est dans l'équipe du Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA) qu'ont été étudiées les techniques de focalisation par Retournement Temporel (TR) dans un guide d'ondes, avec une réception de type Miroir à Retournement Temporel (TRM) linéique multi-éléments[126, 78, 79], puis avec une réception monoélément constituée d'un hydrophone à aiguille[123, 121, 122], puis à l'aide d'un interféromètre laser[120]. Parallèlement, des résultats intéressants ont été présentés lors du congrès QNDE2001 par Anthony Puckett[98, 99] sur les propriétés d'invariance du retournement temporel par réciprocité.

La mise en place expérimentale de la méthode de focalisation ultrasonore a commencé en automne 2001 en utilisant le matériel disponible au LUSI (Figure 13). Une instrumentation Labview a été implémentée en utilisant des générateurs de fonctions HP33120A (10000 points de mémoire) et un oscilloscope Agilent Infinium. Les premières expériences ont validé la possibilité de construire localement à la surface analysée par le laser BMI, une onde acoustique identique à celle générée initialement (comparer les figures en haut à gauche et en haut à droite). L'intérêt de cette approche s'est



confirmée par la présentation[127] et la publication[105] des travaux d'Alexandre Sutin sur la méthode NL-TRA (Nonlinear Time Reversal Acoustics), dont sa visite au LUSSI en nov 2003 a permis de définir les bases de la collaboration[48] encore active aujourd'hui[49].

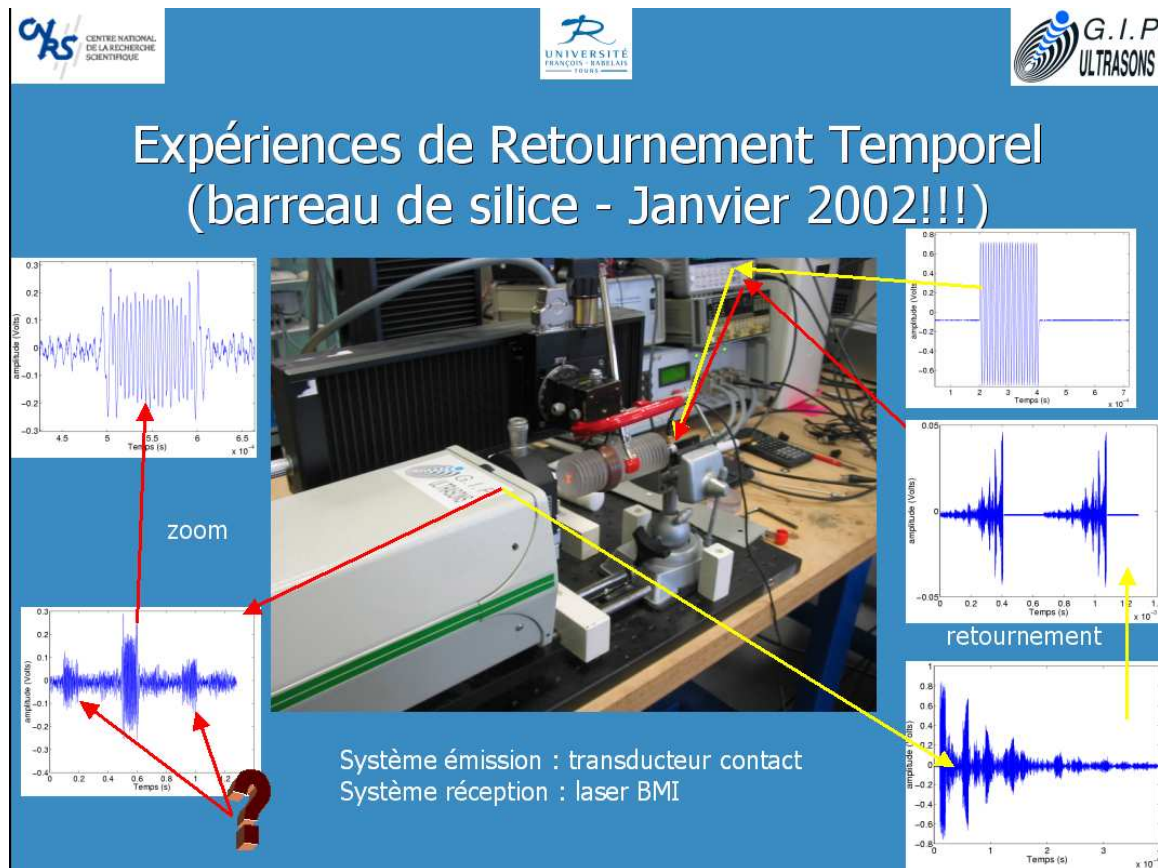


Figure 13 – Dispositif expérimental de retournement temporel dans un barreau cylindrique[39, p. 83], inspiré des travaux de [98] présentés à QNDE2001 sur le retournement temporel dans un barreau cylindrique, et de [123] sur le retournement temporel avec un récepteur monoélément

### 1.5.1 NL-TRA

La collaboration concernait l'amélioration du dispositif de retournement temporel non linéaire (NL-TRA) qui proposait un système emission/reception unique (appelé alors Single Channel TRA) en intégrant de la complexité par l'utilisation de nouvelles sources d'excitations (au moyen de 6 pastilles piézoélectriques collées sur chaque cotés des 2 blocs d'aluminium (Figure 60) ) permettant de réverbérer un champ acoustique à fréquence  $f_1 = 730$  kHz et  $f_2 = 950$  kHz (Figure 14). Le dispositif expérimental et le système d'acquisition numérique (TRA System) a été élaboré par la société ARTANN Laboratories et ses caractéristiques sont données en Annexe 4. La procédure



de traitement du signal et d'extraction de la nonlinéarité par inversion d'impulsion a été implémentée dans le logiciel de contrôle du système d'acquisition :

- émission positive- réception - filtrage - retournement - focalisation
- émission négative- réception - filtrage - retournement - focalisation
- addition des réponses pour extraction des nonlinéarités

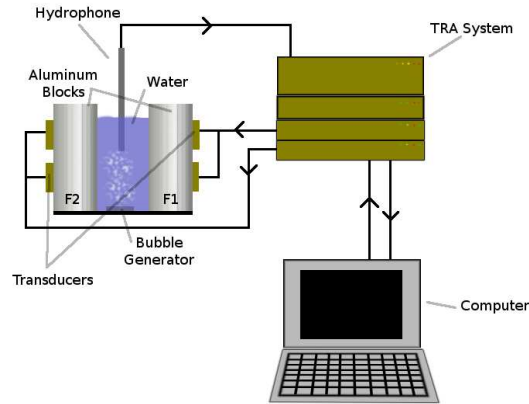
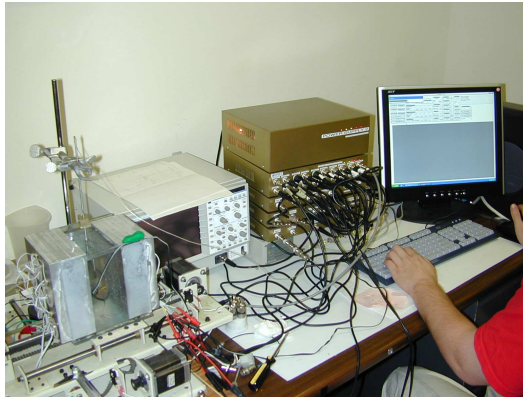


Figure 14 – Dispositif expérimental de l'expérience de Retournement Temporel Non Linéaire dans un fluide enrichi de bulles (NL-TRA)

La deuxième étape de la procédure d'optimisation d'excitation a été réalisée dans un second temps avec la mise en place de la procédure de calibration du champs focalisé (estimé à 200 kPa) en collaboration avec l'Université de Drexel (USA), et d'optimisation de l'excitation par une méthode d'excitation codée de type balayage de fréquence encore appelée "chirp-coded excitation"[118].

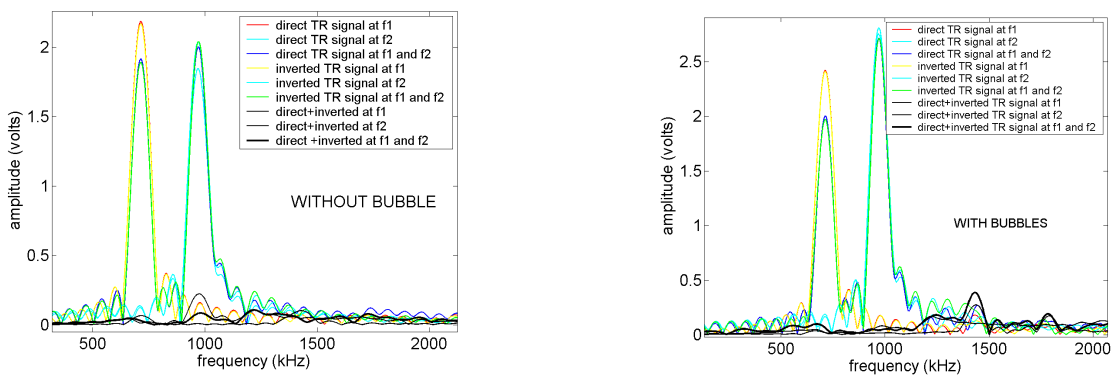


Figure 15 – Signature de la nonlinéarité (difficile à observer ici) par l'apparition de composantes d'intermodulations à  $f_1 + f_2 = 1680\text{kHz}$  (avec et sans bulles dans le milieu)

L'interaction paramétrique a été observée dans la zone de focalisation (Figure 15) et la signature non linéaire entre un milieu avec et sans bulles a été extraite par la méthode d'inversion d'impulsion (Figure 16). Elles ont été présentées au cours du 17ISNA

et publiées[41] au cours du 8ème CFA. Elles sont présentées aujourd’hui comme des méthodes prometteuses pour la caractérisation locale des nonlinéarités d’un milieu complexe[117, p.14].

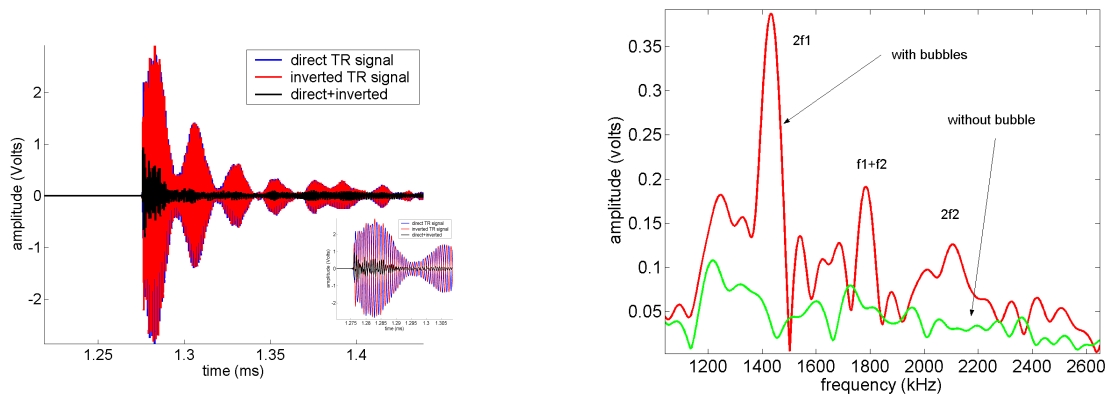


Figure 16 – Signature non linéaire temporelle et fréquentielle extraite après inversion d’impulsion[41]

### 1.5.2 Méthodes locales NEWS-TR et TR-NEWS

C’est dans la deuxième partie du travail de thèse de Thomas Goursole qu’a été transposée cette méthode au cas des matériaux fissurés et dégradés. Il s’agissait de mettre en place l’expérience d’interaction paramétrique focalisée avec mesure laser (réalisées à partir d’un vibromètre laser Polytec) et extraction de nonlinéarité par inversion d’impulsion. Cette expérimentation a été également proposée au consortium du projet AERONEWS lors du "1st year meeting" à Blois en février 2005. Parallèlement, la mise en place de simulation de retournement temporel dans les milieux hystérétiques a confirmé la potentialité de l’outil retournement temporel pour une exploration locale de la nonlinéarité[21]

Dans le contexte d’une localisation plus fine des micro-dégradations associées aux fissures, deux méthodes TR-NEWS et NEWS-TR[132] ont été proposées<sup>1</sup> et résultent d’une symbiose (Figure 17) entre la technique de retournement temporel (TR) développée par l’équipe du LOA et les méthodes de spectroscopie élastiques non linéaires (NEWS).

Le principe de base du retournement temporel traditionnel est le suivant : si un champs d’onde acoustique est complètement déterminé en fonction du temps sur les frontières d’un domaine fermé, il est possible de reconstruire le passé de ce champ en chaque point de ce domaine en renvoyant les signaux dans le domaine, après les avoir préalablement retournés temporellement. C’est la conséquence de l’invariance de

<sup>1</sup>Ce n’est que dans une correspondance du 15 mai 2006 que j’ai proposé l’appellation NEWS-TR et TR-NEWS qui a été acceptée par les auteurs des articles [15] et [86] que nous rédigeons alors.

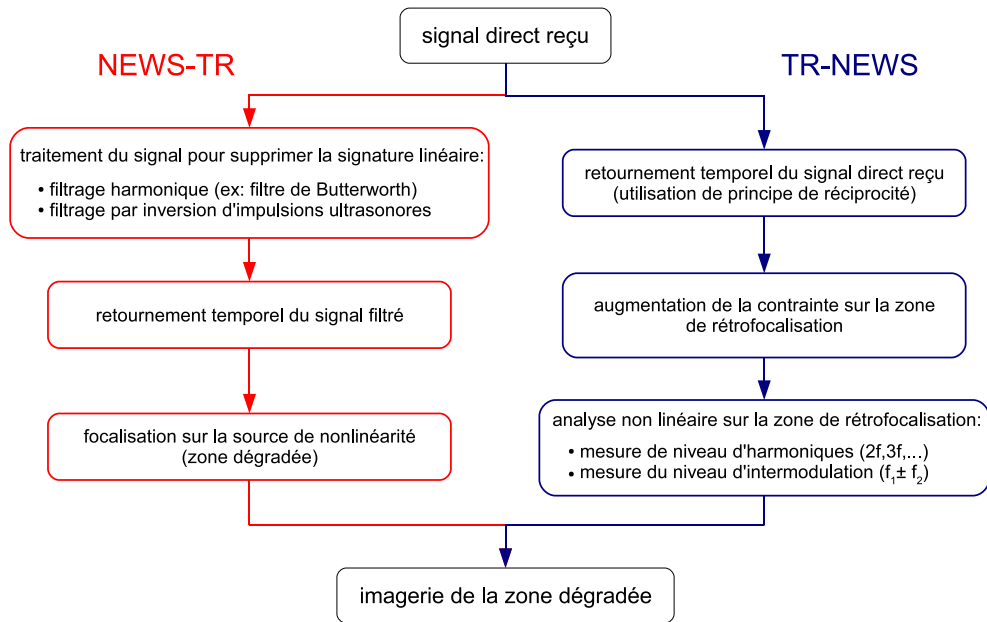


Figure 17 – Représentation des deux combinaisons entre les techniques de Spectroscopie d'Ondes Élastiques Non Linéaires et le Retournement Temporel : pré-traitement non linéaire (NEWS-TR) et post-traitement non linéaire (TR-NEWS)

l'équation des ondes linéaire par rapport au temps (partie 3.4.3). En d'autres termes, le processus TR est tel que, les ondes enregistrées aux frontières du domaine en fonction du temps, rétro-focalisent en temps et en espace sur les sources acoustiques. L'un des avantages du processus TR est de localiser, à l'aide d'un post-traitement, ces régions importantes de diffraction (cavités, interfaces avec contrastes d'impédances, etc.), qui sont cachées dans le domaine. Pour de plus petits diffuseurs tels que les zones de dégradation, les liaisons faibles ou les petits défauts, la sensibilité du processus TR classique atteint les limites des techniques acoustiques classiques. Notre expérience dans les techniques NEWS a montré que les micro-dégradations agissent sur les ondes acoustiques par un processus non linéaire, générant principalement des harmoniques, ou d'autres effets d'intermodulation, plutôt que des effets linéaires. Ainsi, selon notre approche, la procédure TR doit être améliorée de sorte que l'essentiel du traitement du signal soit concentré sur les différentes signatures non linéaires produites à l'occasion de la propagation des ondes dans le domaine. Une des solutions consiste à uniquement sélectionner l'énergie/information correspondant à la partie non linéaire de la réponse du domaine et de la retourner dans ce même domaine à l'aide de la procédure TR classique. En conséquence, le signal rétro-propagé sera amené à se focaliser à la source de nonlinéarité, c'est-à-dire dans la zone de dégradation où les harmoniques ont été créés, alors que les " diffuseurs linéaires " seront insensibles à cette excitation, qui se trouve être extrêmement complexe. L'opération TR peut être effectuée dans un premier temps afin de rétrofocaliser de l'énergie dans une zone limitée afin de solliciter le comportement non linéaire par des déformations de grandes amplitudes. De la même manière, l'analyse NEWS peut être réalisée en pré-traitement afin de solliciter les sources locales de nonlinéarité qui seront ensuite extraites par un processus TR.

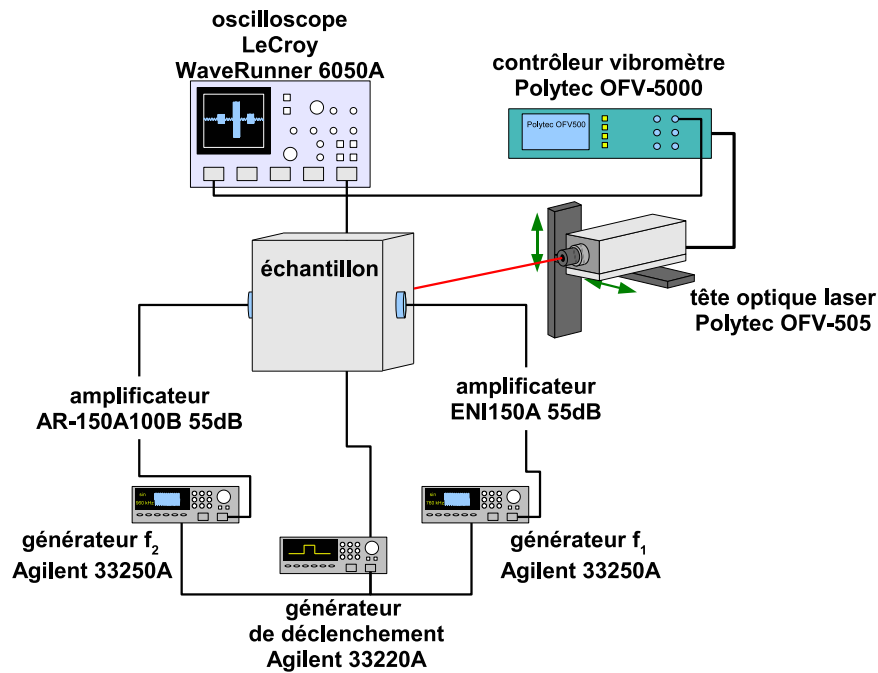


Figure 18 – Dispositif expérimental des expériences TR-NEWS et NEWS-TR par interaction paramétrique avec deux ondes acoustiques.

On parle alors de NEWS-TR dans la mesure où le processus RT effectue le post-traitement et que la nonlinéarité est révélée par le renversement temporel linéaire. Cette méthode a constitué la grande part des simulations en code pseudo-spectral effectuées en collaboration avec Samuel Callé, Olivier Bou Matar et Thomas Goursolle, présentées en 2005[21] au sein de la communauté internationale et publiée en 2007[63] ; pendant que la validation expérimentale était publiée qu'en 2007[128] par l'équipe du Los Alamos Laboratory.

On parle aussi de TR-NEWS dans la mesure où TR constitue un pré-traitement à l'analyse NEWS et la nonlinéarité est alors sollicitée par le renversement temporel linéaire utilisant le principe de réciprocité acoustique. Cette dernière méthode expérimentale dans un premier temps (NL-TRA), a été développée parallèlement au LUSI dans le cadre du projet interne FULTI-TRAIN (Focalisation Ultrasonore pour la Localisation des Inclusions -2002) et fait l'objet d'une collaboration avec Alexander Sutin depuis 2005. Les deux méthodes TR-NEWS et NEWS-TR ont été étudiées expérimentalement (Figure 18) et numériquement dans le cadre de la Thèse de Thomas Goursolle.

## TR-NEWS

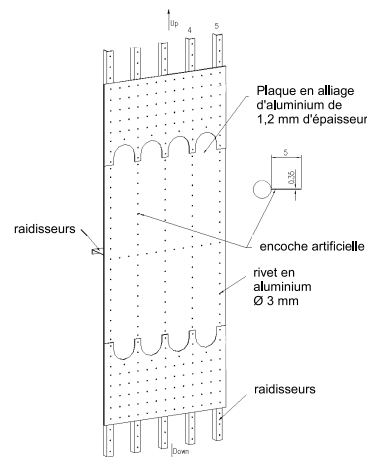
Le dispositif expérimental TR-NEWS est une transposition du dispositif NL-TRA avec les adaptations suivantes :

- amélioration du système émission/réception "laser/transducteur"

- mesure localisée par interferométrie laser (hydrophone dans le cas de NL-TRA)
- excitation par interaction paramétrique  $f_1$  et  $f_2$  et inversion d'impulsion pour extraction des nonlinéarités
- amélioration générale de l'automatisation de l'instrumentation (Labview 7® fréquence d'acquisition, mémoire des signaux arbitraires, amplificateurs)



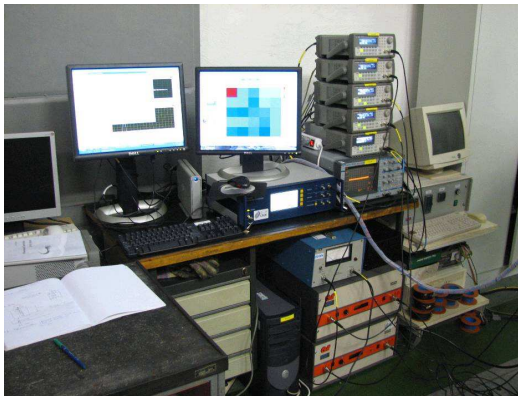
(a)



(b)

Figure 19 – (a) Photographie de la structure utilisée au centre aéronautique VZLU à Prague. (b) Représentation du rivetage et des raidisseurs

De nombreuses expériences ont été réalisées au LUSI et dans le cadre de collaborations internationales afin de tester l'efficacité de TR-NEWS en fonction de divers paramètres expérimentaux : excitation complexe (Figure 32), milieux complexes (Figure 33), réception laser et hydrophone (Figure 34).



(a)



(b)

Figure 20 – (a) Instrumentation TR-NEWS installée sur le site du centre aéronautique VZLU à Prague. (b) Vibromètre laser Polytec OFV-505 mesurant la vitesse à la surface de l'échantillon



Cette démarche systématique de validation d'une méthode par la modification des paramètres expérimentaux constitue la base de l'approche systémique de l'instrumentation ultrasonore des milieux complexes. Cette démarche a permis de mettre en oeuvre une instrumentation commune avec l'Université de Courtrai dans le cadre d'AERO-NEWS (Figure 18) dont l'objectif était d'appliquer TR-NEWS sur une structure aéronautique (Figure 19). La mesure localisée de la signature non linéaire (Figure 21) de l'intermodulation à  $f_+ = f_1 + f_2 = 680$  kHz, extraite par inversion d'impulsion a permis l'imagerie de la zone fissurée (Figure 22a) autour d'un rivet préalablement fragilisé par une encoche artificielle[86, 44].

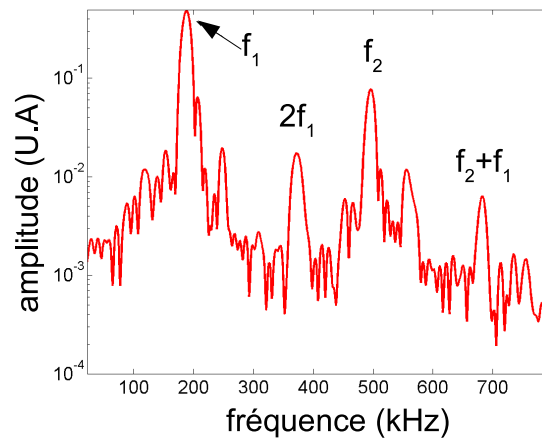
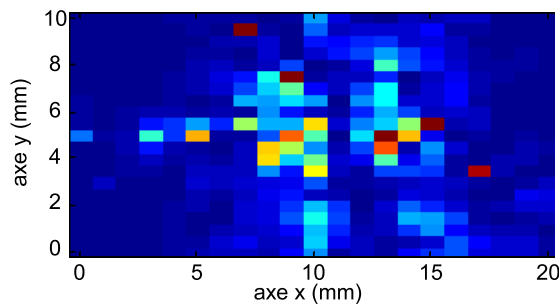
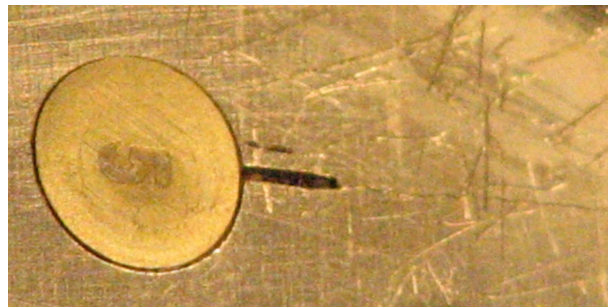


Figure 21 – Spectre de l'interaction paramétrique des deux ondes de fréquence  $f_1 = 180$  kHz et  $f_2 = 500$  kHz focalisées simultanément par TR-NEWS au niveau de la surface de la structure explorée par le vibromètre laser



(a)



(b)

Figure 22 – (a) Représentation de la matrice du niveau d'interaction paramétrique mesuré à la surface de l'échantillon pour la composante à la fréquence somme  $f_+ = 680$  kHz. (b) Photographie du rivet avec l'encoche artificielle et la fissure créée

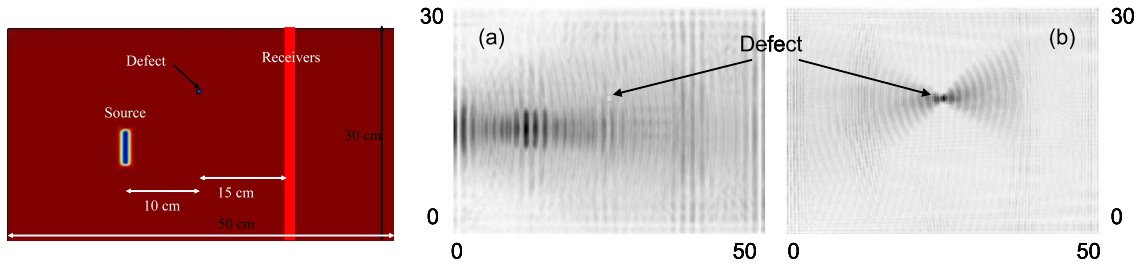


Figure 23 – *Domaine de simulation numérique 2D de NEWS-TR. (a) rétrofocalisation par retournement temporel linéaire sur la source initiale. (b) rétrofocalisation par retournement temporel de la composante non linéaire sur le défaut, unique source de nonlinéarité dans le domaine*[107]

## NEWS-TR

L'instrumentation associée à NEWS-TR dont les résultats numériques ont été présenté à ISNA2005 a été plus délicate à mettre en œuvre puisqu'il s'agit de mesurer une source de nonlinéarité rétrofocalisée par retournement temporel (Figure 23). Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance *a priori* de la position de cette nonlinéarité et être sûr que son niveau est supérieur à toute nonlinéarité parasite.

Le dispositif initial a donc été mis en œuvre pour tester le niveau de nonlinéarité autour d'une zone fissurée présente (proche du trou central) dans l'éprouvette A0025 fournie par la société VZLU (Figure 24). Ces résultats préliminaires ont été présentés lors de la réunion de projet AERONEWS à Bristol et confirmée lors de la réunion annuelle à Tenerife. L'excitation initiale est réalisée avec un transducteur Panametrics V152 à 1 MHz que l'on excite avec un train d'ondes sinusoïdal ( $f_0 = 1$  MHz,  $N = 30$ ) de 50 mV d'amplitude et amplifié de 60 dB (Amplificateur ENI). La réception de la composante non linéaire (harmonique 2) est faite avec le transducteur Panametrics V104 à 2.25 MHz en utilisant la méthode d'inversion d'impulsion utilisée pour TR-NEWS. Le signal est retourné, amplifié par le même amplificateur et renvoyé par le transducteur V104. Le laser explore la région autour de la fissure et les spectres sont donnés par les courbes présentées en figure 24. Il a été mis en évidence une augmentation de la nonlinéarité autour de la zone fissurée. Cette première instrumentation possédait un certain nombre de limitation (échantillonnage : 10 MHz ; nombre de points de la coda : 10000 ; bande passante du laser : 1.5 MHz ; générateur de fonction arbitraire HP33220A limité en mémoire) qui allait conduire à l'amélioration du dispositif expérimental réalisé dans le cadre de la Thèse de Thomas Goursolle (Figure 25).

Depuis ces résultats préliminaires, d'autres résultats[132, 128] ont validé NEWS-TR comme pouvant détecter des zones de grande nonlinéarité proches des extrémités des fissures, zones où la nonlinéarité dynamique semble plus importante (Figure 26).

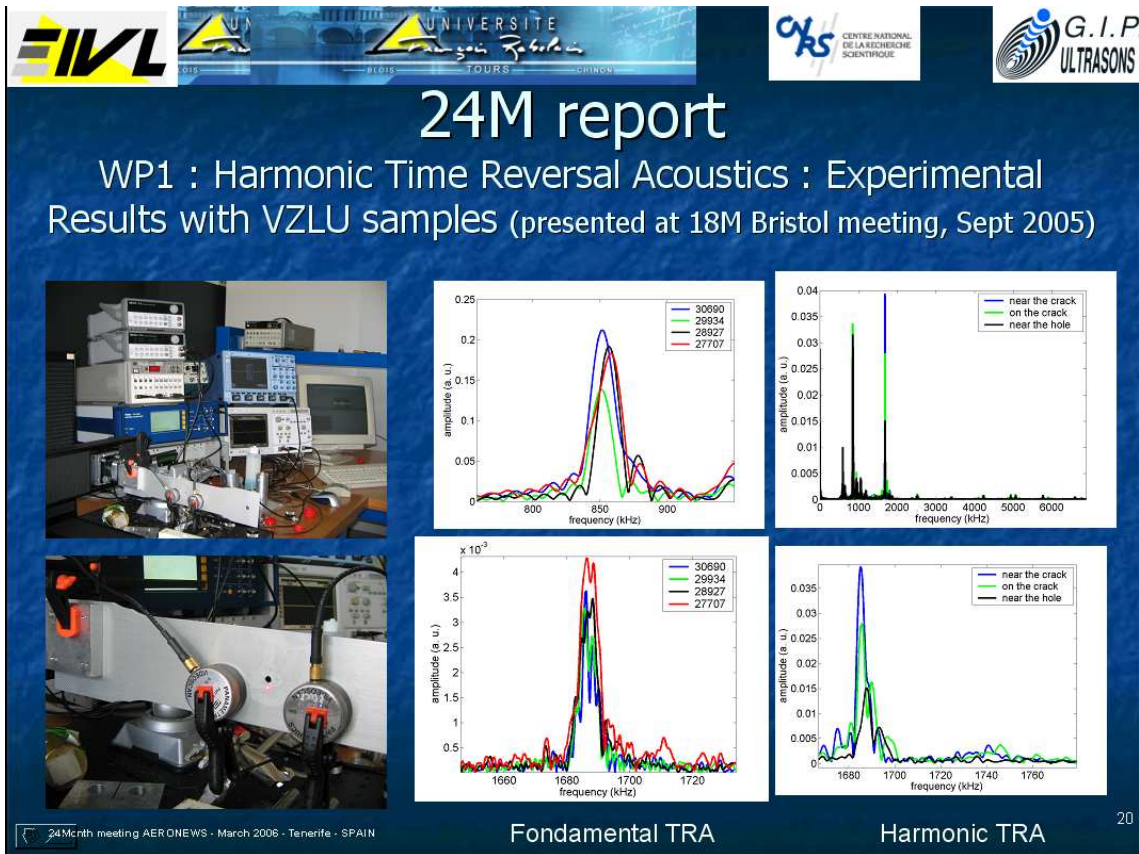


Figure 24 – Dispositif expérimental de mesures de nonlinéarités proches de la fissure par NEWS-TR. Spectre du signal dans le cas de la rétrofocalisation linéaire en fonction de la position du laser (fondamental TRA) et dans le cas de la rétrofocalisation de la composante non linéaire (Harmonic TRA)

### 1.5.3 Bilan et perspectives

Deux dispositifs expérimentaux ont été élaborés au LUSI permettant de proposer une analyse localisée de la nonlinéarité d'un système pouvant être complexe en utilisant la focalisation par retournement temporel : TR-NEWS et NEWS-TR. Ces dispositifs expérimentaux, aujourd'hui encore considérés comme précurseurs et demandant une instrumentation lourde et coûteuse, semble toutefois présenter une perspective très intéressante en terme d'applications pour l'exploration des milieux complexes[117, p.14]. Mais comme toute méthode de métrologie de la nonlinéarité, celle-ci doit passer par une validation associée à une procédure d'étalonnage de l'amplitude des sources d'excitation. Dans le cas de sources focalisées par retournement temporel, l'autocalibration de la zone de focalisation présente des difficultés dans la mesure où elle est en compétition avec l'objectif d'affiner temporellement et spatialement la tâche focale, rendant ainsi plus difficile la mesure de son amplitude.



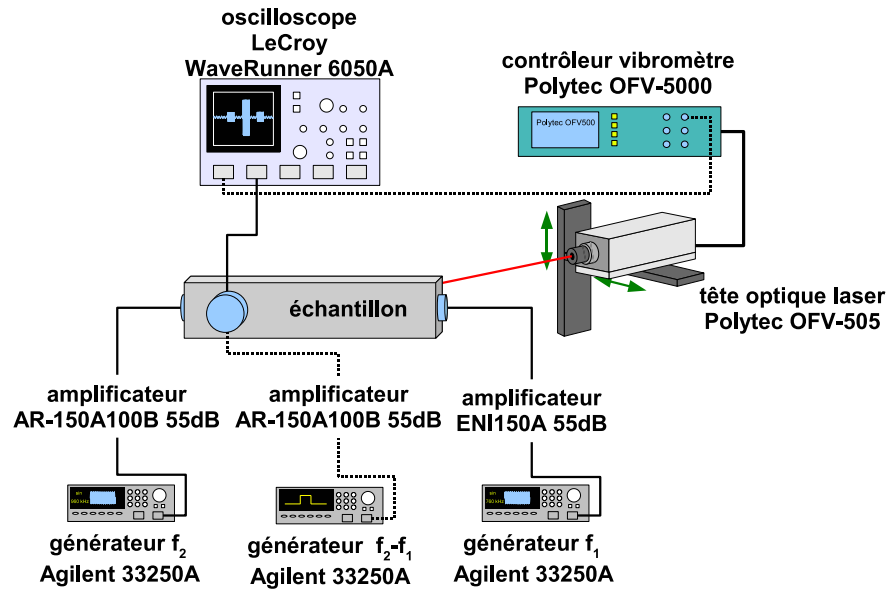


Figure 25 – Dispositif expérimental amélioré de la méthode NEWS-TR réalisé au cours de la Thèse de Thomas Goursolle

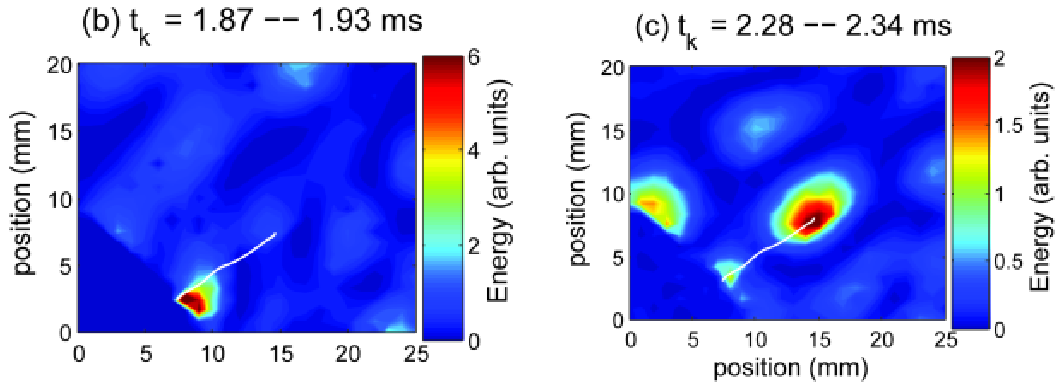


Figure 26 – Visualisation de la rétrofocalisation de la composante non linéaire sur les zones dégradées aux extrémités de la fissure [128] (Avec l'amabilité de T.J. Ulrich, Los Alamos-USA)

## 1.6 Métrologie et étalonnage des mesures non linéaires

Faire le choix de réaliser des mesures non linéaires ne peut se faire sans l'économie du passage par l'étape indispensable d'étalonnage des sources d'excitation. Les quantités mesurées doivent être les quantités prédites dans les modèles non linéaires. Cette étape d'étalonnage est indispensable car toute signature non linéaire dépend de l'amplitude de l'excitation car les solutions des équations non linéaires ne vérifient pas le principe de superposition.

Cette contrainte expérimentale présente l'avantage de pouvoir être convertie en une richesse si la procédure d'étalonnage est bien menée, donnant ainsi la perspective de

définir des méthodes d'étalonnage robustes et stables exploitant la nonlinéarité des systèmes. Cette démarche n'est pas originale dans la mesure où, en électronique, la stabilisation de tension d'un générateur peut être effectuée par l'utilisation d'une varistance confirmant ainsi une utilisation intéressante de la nonlinéarité des systèmes à des fins métrologiques. Il faut donc une métrologie adaptée aux méthodes non linéaires choisies et une métrologie adaptée aux objectifs d'imagerie.

La facilité d'observation de la génération d'harmoniques cache la difficulté liée à son étalonnage rigoureux dans la mesure où la génération d'harmoniques intervient dans l'ensemble de la chaîne d'acquisition, surtout dans le processus d'amplification des signaux. Du fait de son caractère cummulatif, la signature non linéaire est d'autant plus difficile à mesurer que la distance de propagation est plus courte, ce qui est le cas des matériaux composites par exemple. Cet effet sera de plus amplifié par la nécessité de disposer d'amplificateurs plus large bande permettant de générer des signaux sur de courtes distances de propagation, conduisant alors à une augmentation des niveaux de bruit et de distorsion harmonique ramenés par l'amplificateur. La même remarque s'applique au cas de la méthode de modulation de phase même si celle-ci semble bénéficier d'un niveau de découplage des sources de nonlinéarité résultat du processus d'interaction paramétrique et de modulation.

L'étalonnage des méthodes NEWS-TR et TR-NEWS reste un problème ouvert surtout pour NEWS-TR, même si quelques expériences préliminaires ont été conduites en collaboration avec A. Sutin et Peter A. Lewin en 2005, puis dans le cas de la Thèse de Thomas Goursolle.

## 1.7 Conclusion et perspectives

Aujourd'hui en 2008, deux systèmes d'instrumentation acoustique non linéaire sont disponibles au sein de l'Équipe CUP pour les mesures **globales** de nonlinéarité dans les solides homogènes (méthode de modulation de phase), et pour des mesures **locales** de nonlinéarité dans les milieux complexes (TR-NEWS et NEWS-TR). Ces deux systèmes ont été validés expérimentalement et dans le cadre d'un projet Européen. Ils sont en voie d'amélioration technologique par la prise en compte d'une instrumentation ultra-rapide laser (consulter les travaux du groupe de T. Tratoudaki de Nottingham University[28] qui a mis en place la méthode de modulation de phase couplant des ondes de surfaces et des ondes longitudinales (voir partie 2).

### 1.7.1 Automatisation et portabilité des systèmes de mesure

La démarche instrumentale s'est systématiquement accompagnée d'un objectif d'automatisation des mesures (instrumentation Labview) et de portabilité du dispositif

(système TR-NEWS en collaboration internationale, systèmes développés par Artann Laboratories, et récemment en 2007 par le système NI PXI-1033- NI PXI 51-22). Cette démarche permet d'être à jour sur la potentialité d'exploiter la rapidité et la puissance des systèmes d'acquisition en développement permanent.

### 1.7.2 Perspectives d'innovation technologiques

Les perspectives d'innovation liées à une méthode se mesurent en intégrant les progrès réalisés dans le même domaine par d'autres méthodes, et par les potentialités de prise en compte des innovations technologiques actuelles. Dans le contexte du CND, une part importante de l'innovation concerne l'émission acoustique qui semble avoir un certain potentiel de localisation. Concernant la possibilité d'intégrer des innovations technologiques actuelles, les nouvelles méthodes d'excitation multi-échelles et multi-sources couplées aux techniques de codage de sources réponds aux besoins des techniques non linéaires devant tenir impérativement compte de la qualité et la fiabilité des excitations. En terme de réception du signal acoustique, il est désormais certain que les nouvelles technologie laser contribuent à la qualité des mesures acoustiques, et constituent, en raison de leurs propriétés de mesures sans contact, un composant indispensable à toute caractérisation future en termes de END/CND.

### 1.7.3 Codage d'excitation - Complexification de l'excitation

Afin d'améliorer la qualité de la rétrofocalisation, nous avons appliquée une méthode de codage d'excitation appelée chip-coded excitation[118], qui permet, par l'envoi d'une excitation en balayage de fréquence (Figure 27), d'augmenter le rapport signal sur bruit de la mesure.

Si on considère une excitation de type  $e(t)$  dans un système de réponse impulsionnelle  $h(t)$ , la réponse est donnée par (Eq.II.2.9)

$$y(t) = e(t) * h(t) = \int_{\mathbb{R}} h(t - t')e(t')dt'. \quad (\text{II.1.2})$$

Si le signal d'excitation est une fonction de Dirac, alors la réponse est exactement la réponse impulsionnelle. Si on retourne temporellement la réponse et que l'on applique cette excitation  $e_2(t) = y(-t)$  au même système, on a alors

$$y_2(t) = e_2(t) * h(t) = h(-t) * h(t) = \Gamma_h(t), \quad (\text{II.1.3})$$

donnant la fonction d'autocorrélation de la réponse impulsionnelle.

En pratique, au lieu de l'impulsion de Dirac, on utilise un balayage de fréquence. Dans ce cas, si on effectue la corrélation  $y_2(t)$  de la réponse  $y(t)$  avec l'excitation  $e(t)$ ,

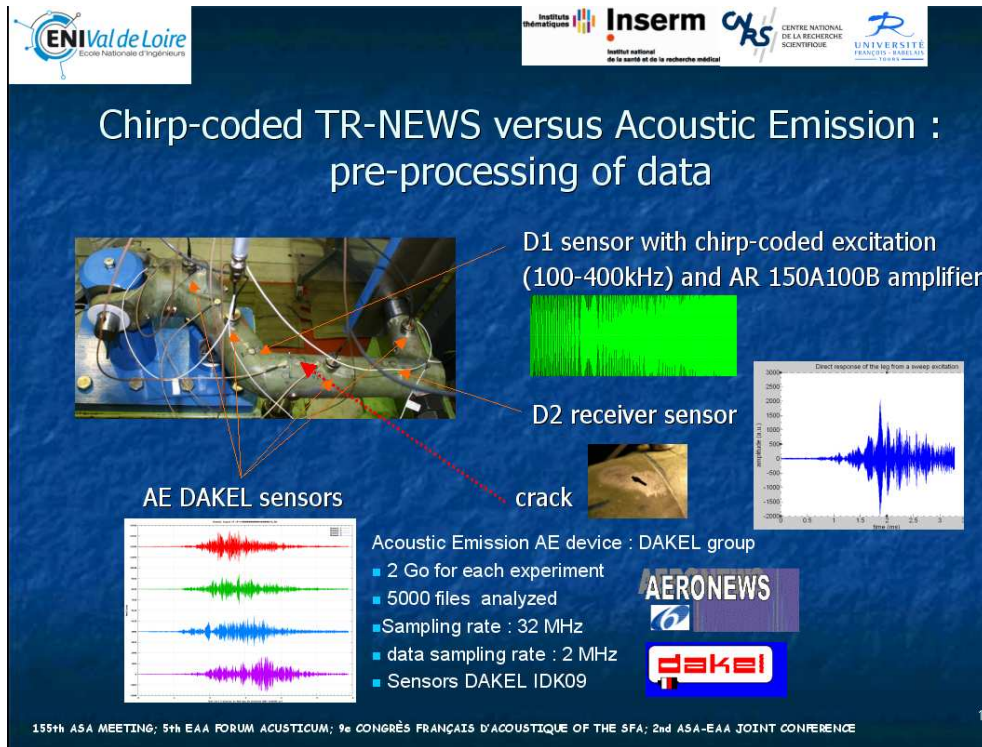


Figure 27 – Dispositif expérimental de comparaison sweep-TR-NEWS (excitation par balayage de fréquence) et émission acoustique sur une structure aéronautique (fourche de train d'atterrissage) [42]

on a

$$y_2(t) = e(-t) * y(t) = e(-t) * e(t) * h(t) = \Gamma_e(t) * h(t). \quad (\text{II.1.4})$$

Dans le cas de l'excitation balayée en fréquence qui possède une densité spectrale constante dans sa bande de variation, on peut estimer que la réponse  $y_2(t)$  est proportionnelle à la réponse impulsionnelle du milieu de propagation qui sera ensuite temporellement retournée dans le processus TR-NEWS afin d'obtenir une réfoculation. Cette méthode "sweep TR-NEWS" fait partie des méthodes d'optimisation d'excitation[101], et est une procédure d'optimisation de l'excitation, qui se trouve être invariante si l'on applique la méthode d'inversion d'impulsion qui consiste à changer  $e(t)$  en  $-e(t)$ . Cette propriété permet d'extraire, à partir de la méthode "sweep TR-NEWS", la signature non linéaire par une méthode d'inversion d'impulsion en soustrayant les réponses alors qu'avec une procédure d'inversion d'impulsion classique, il faut additionner les réponses (Eq.II.3.45 et figure 49).

Dans ce cadre, une étude permettant la comparaison des méthodes TR-NEWS et d'émission acoustique a donc commencé par le stage de master de Mathieu Domenjoud en collaboration avec la société DAKEL[49]. La comparaison est réalisée sur une structure aéronautique complexe (Figure 27) sur laquelle un système CND à émission acoustique (4 capteurs IDK09 DAKEL) et un système TR-NEWS étaient simultanément positionnés. Durant tout le cycle de fatigue de la structure, 2 Go de données ont été enregistrées afin de comparer la sensibilité des deux méthodes. L'excitation initiale TR-

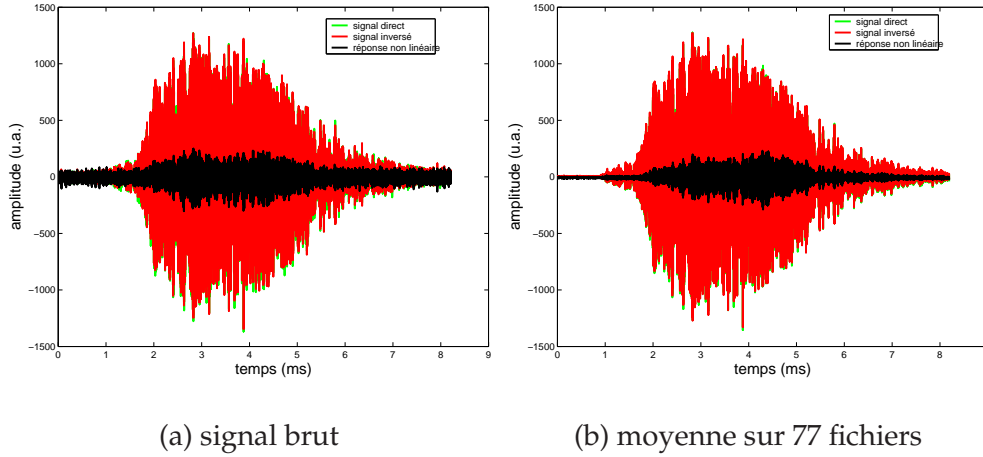


Figure 28 – Réponse à une excitation positive (signal direct) et négative (signal inversé) de type "sweep TR-NEWS". La réponse non linéaire est extraite par addition des réponses (réponse non linéaire) résultant de la méthode d'inversion d'impulsion

NEWS était de type "chirp-coded" (balayage de fréquence) et la réponse impulsionnelle (appelée coda) était extraite par corrélation, comme décrit ci-dessus. Une étude préliminaire a permis de montrer que les niveaux de nonlinéarité extraits, après pré-traitement des données (Figure 28), et par une analyse temps-fréquence (Figure 29) étaient différents suivant les niveaux d'excitation et de l'état de fatigue de la structure. La tentative d'étalonnage de la nonlinéarité extraite par "sweep TR-NEWS" est en cours et a commencé par une étape préliminaire d'étalonnage du système d'acquisition (Figure 30).

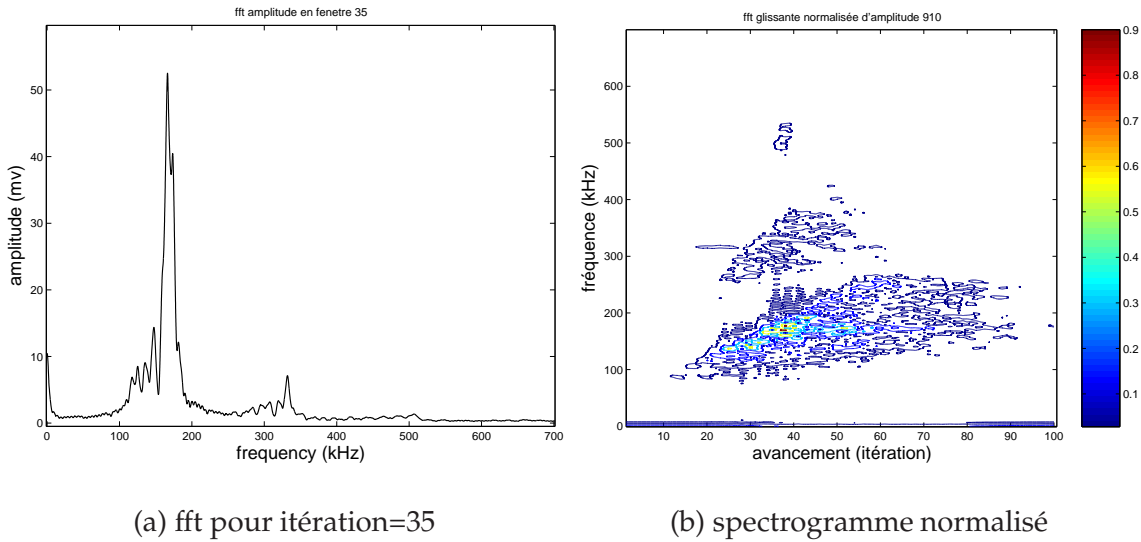


Figure 29 – (a) Spectre (non normalisé) en fenêtre 35. (b) Spectrogramme normalisé de la réponse non linéaire extraite après inversion d'impulsion.



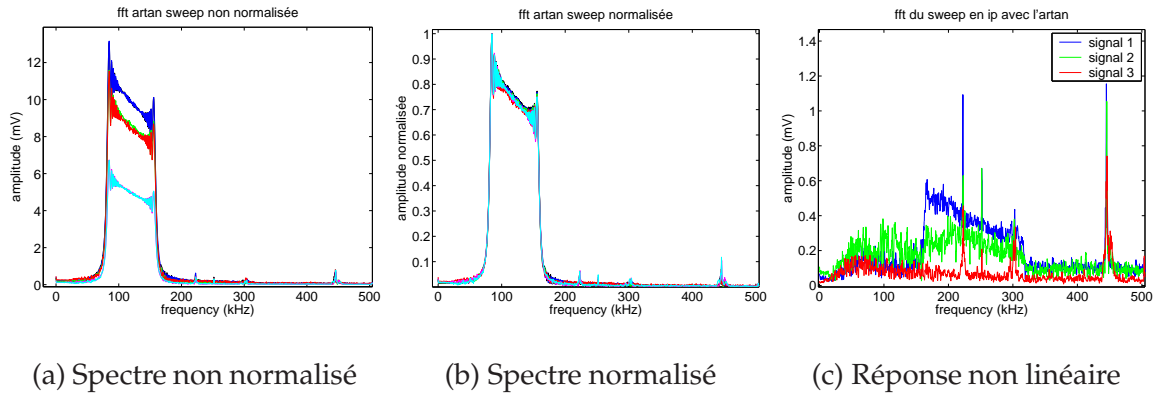
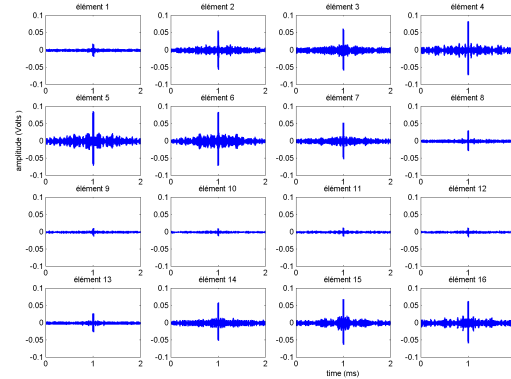


Figure 30 – Étalonnage de la nonlinéarité (extraite par inversion d'impulsion) du système d'acquisition développé par Artann Laboratories (voir Annexe 4.3.2) dans le cas d'une excitation de type balayage en fréquence pour 3 différentes amplitudes d'excitation. La signature non linéaire (c) est extraite dans la bande 150-300 kHz correspondant aux "harmoniques" de la bande d'excitation



(a)



(b)

Figure 31 – (a) Dispositif d'excitation tri-fréquence ou de symétrisation de l'excitation dans le cas de l'étude de propagation non linéaire dans un milieu mou axisymétrique (gélatine). (b) Signal TR-NEWS pour chaque élément de la barrette CND à 16 éléments (Vernon SA) en vue de l'optimisation de la focalisation par excitation multi-sources (voir Figure 32 pour le dispositif expérimental)

## 1.8 Approche systémique de l'instrumentation

Chaque système a sa propre signature non linéaire. L'amplificateur génère des saturations, donc des harmoniques plutôt impaires ; nonlinéarité dite classique avec une variation quadratique de l'harmonique deux en fonction de l'amplitude d'excitation. Le transducteur possède une signature non linéaire classique, même si les phénomènes

de résonances dues à la transduction électro-acoustique semblent posséder des signatures non classiques[72]. Les zones fissurées possèdent des nonlinéarités non classiques caractérisées par une variation linéaire de l'harmonique deux en fonction de l'amplitude d'excitation. La quantification numérique, qui est un processus non linéaire amnésique est caractérisé par une perte d'information, donc une perte d'énergie devant être évaluée dans le processus d'étalonnage. Il faut donc intégrer toutes ces caractéristiques dans la façon d'exciter le système et avoir une connaissance *a priori* de la signature du système à mesurer.

C'est cette approche systémique qui a permis l'amélioration du système TR-NEWS, qui est donc passée par de nombreuses étapes pour lesquelles plusieurs sources ont été testées (Figures 31 et 32) et plusieurs configurations mise en place (Figures 33 et 34) afin d'améliorer expérimentalement la qualité de la rétrofocalisation TR-NEWS.

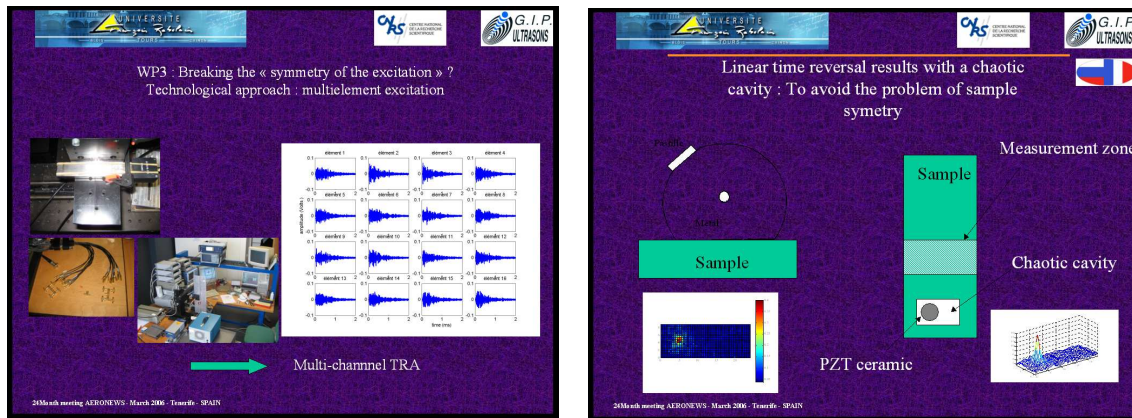


Figure 32 – Augmentation de la qualité de la focalisation TR-NEWS par suppression des lobes secondaires réalisée à partir de la multiplicité des sources ultrasonores ou par l'adjonction d'une cavité chaotique[20]

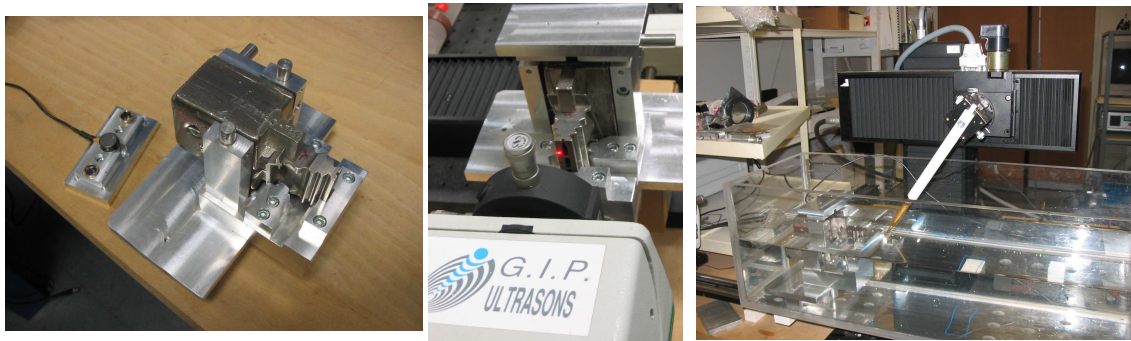


Figure 33 – Échantillon complexe en titane (issu de l'industrie aéronautique) monté sur un support spécifique (a), testé avec TR-NEWS utilisant une réception par laser BMI (b) et en immersion avec un hydrophone à aiguille (c)

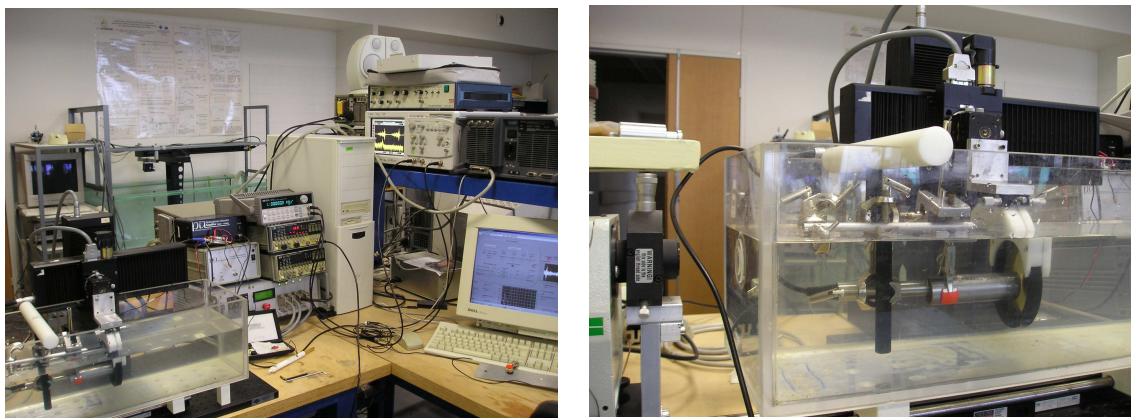


Figure 34 – TR-NEWS avec un échantillon homogène cylindrique immergé avec un hydrophone à membrane





## Chapitre 2

# Modélisation des systèmes acoustiques non linéaires

### 2.1 Introduction

Le fait de travailler dans les sciences du non linéaire oblige un virage à 180° sur la conception de l'analyse des systèmes. En effet, un système non linéaire est un système pour lequel il est nécessaire d'être prudent lorsque l'on utilise les outils adaptés aux systèmes linéaires. Les notions d'impédance acoustique, de fonction de transfert, de spectre de Fourier et de bande passante sont des notions à manipuler avec précaution. La dépendance en amplitude de la réponse d'un système non linéaire peut occasionner des variations suffisamment significatives de ces grandeurs. Ainsi, une variation de 5% sur l'amplitude d'une onde acoustique, engendre une variation de 10% sur sa puissance et de 20% sur la composante du premier harmonique, proportionnelle au coefficient non linéaire ; ce qui explique la très grande difficulté à caractériser le paramètre non linéaire  $\beta$ , mais qui *a contrario* impose et demande une métrologie fine.

Cet état de fait impose une contrainte supplémentaire dans la démarche de modélisation non linéaire : une connaissance *a priori* des ordres de grandeur des phénomènes physiques en jeu, ou, en tout cas, une vigilance supplémentaire sur les hypothèses de modélisation. Le principe de superposition n'étant pas valable dans le cas général, une interaction "modèle-expérience" devient bien plus indispensable encore que dans le cas de l'analyse des systèmes linéaires.

Lorsque l'on regarde plus attentivement l'origine de cet effet aux conséquences significatives du point de vue expérimental, toutes ces grandeurs, qu'il est au demeurant commode de manipuler, résultent d'une propriété d'invariance des systèmes linéaires. C'est la raison pour laquelle une partie de la thématique de recherche déjà initiée lors de ma Thèse de Doctorat sur la synchronisation des systèmes non linéaires est restée consacrée à l'étude et la recherche des symétries et quantités invariantes qui ont leur

équivalent linéaire au travers des invariants spectraux de Fourier à la base de la définition des notions d'impédance, de fonctions de transfert, etc. Cette démarche s'appuie sur des travaux théoriques déjà exploités dans le domaine de l'optique non linéaire (propagation soliton) et très récemment dans le domaine très technique de l'automatique de la commande non linéaire de systèmes plats. Quelques équipes théoriciens en acoustique avaient abordé cet aspect mais devant la complexité des calculs et devant le manque de logiciel de calcul formel, cette approche avait été momentanément délaissée. Ca n'est qu'à la fin du XXème que plusieurs équipes d'acousticiens ont revisité cette approche et ont permis de mettre à jour un certain nombre de quantités invariantes dans des applications aussi concrètes que la propagation acoustique dans les milieux à bulles. Notre contribution dans le domaine très concret du CND, a permis d'interpréter un certain nombre de changement de variables effectués pour la résolution de la propagation acoustique dans les milieux non linéaire en présence d'atténuation et de diffraction due à la source ultrasonore (équations acoustiques de Burger, KZK, hystérétique). Cette thématique a généré un certain nombre d'échanges avec la communauté théoricienne (Laboratoire de Physique Théorique de Université de Tours, Karlskrona University, Moscow State University, Vladivostok University) et un projet PICS CNRS pourrait être prochainement proposé dans ce cadre.

## 2.2 Propriétés générales des systèmes non linéaires

### 2.2.1 Linéarité et stationnarité d'un système

Soit deux signaux  $|x\rangle$  et  $|y\rangle$  de l'espace<sup>1</sup> des signaux  $\mathcal{S}$  et  $f$  une application de  $\mathcal{S}$  dans  $\mathcal{S}$ . On dira que  $f$  est **linéaire** si, pour  $a$  et  $b$  constants, on a

$$f(a|x\rangle + b|y\rangle) = af(|x\rangle) + bf(|y\rangle). \quad (\text{II.2.1})$$

Le système est dit **stationnaire** si les opérateurs  $F$  (associé à  $f$ ) et  $T_\tau$  (opérateur translation) commutent dans le temps (Fig.35), *i.e.*

$$F(T_\tau|x\rangle) = T_\tau(F|x\rangle) \Leftrightarrow [FT_\tau - T_\tau F]|x\rangle = 0 \Leftrightarrow [F, T_\tau]|x\rangle = 0. \quad (\text{II.2.2})$$

La linéarité et la stationnarité sont indispensables pour la définition des représentations temporelles et spectrales des signaux et systèmes.

---

<sup>1</sup>La notation bra  $\langle x|$  et ket  $|x\rangle$  est inspirée de la physique quantique

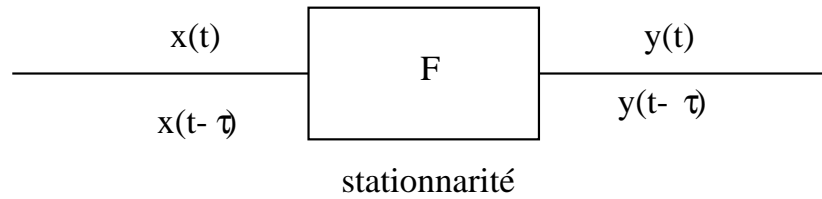


Figure 35 – *Système linéaire et invariance temporelle (stationnarité)*

### 2.2.2 Définition de la représentation d'un système

À partir de l'opérateur  $F$  modélisant un système ( $\mathcal{S}$ ), on définit  $|y\rangle = F|x\rangle$  la réponse de  $F$  à l'excitation  $|x\rangle$ . Si on projette  $|x\rangle$  et  $|y\rangle$  sur des bases orthonormées continues  $\{|e(s)\rangle\}$  et  $\{|e(v)\rangle\}$

$$|y\rangle = \int_{\mathbb{R}} y(s) |e(s)\rangle ds, \quad (\text{II.2.3})$$

$$|x\rangle = \int_{\mathbb{R}} x(v) |e(v)\rangle dv, \quad (\text{II.2.4})$$

alors  $|y\rangle = F|x\rangle$  donne, grace au principe de superposition linéaire :

$$|y\rangle = F \left[ \int_{\mathbb{R}} x(v) |e(v)\rangle dv \right], \quad (\text{II.2.5})$$

$$= \int_{\mathbb{R}} x(v) F[e(v)] dv, \quad (\text{II.2.6})$$

et de ce fait, on obtient une représentation mathématique d'un système linéaire du système  $\mathcal{S}$  par les éléments matriciels  $A(s, v)$  donnés par

$$A(s, v) = \langle e(s) | F | e(v) \rangle. \quad (\text{II.2.7})$$

La notion de représentation est souvent associée à la notion de projection. Comme dans les systèmes de coordonnées et de projection des vecteurs dans l'espace, il est nécessaire de définir des représentations en fonction des symétries du système. C'est ainsi que les représentations en coordonnées sphériques, cylindriques, elliptique, ou parabolique sont choisies pour simplifier l'analyse des systèmes possédant les symétries associées.

### Représentation temporelle des systèmes linéaires

Considérons le système linéaire  $\mathcal{S}$  exprimé à partir d'une représentation purement temporelle  $h(t, t')$  par :

$$y(t) = \int_{\mathbb{R}} h(t, t') x(t') dt' = F|x\rangle. \quad (\text{II.2.8})$$

On peut montrer que si le système représenté par  $h(t, t')$  est stationnaire, alors  $h(t' + \tau, t') = h(t, t - \tau) = h(t - t') = h(\tau) \quad \forall t, t', \tau$  et

$$\boxed{y(t) = \int_{\mathbb{R}} h(t - t') x(t') dt',} \quad (\text{II.2.9})$$

indiquant que la sortie  $y(t)$  de  $F$  est le produit de convolution de l'entrée  $x(t)$  par  $h(t)$ , la représentation temporelle du système linéaire.

### Représentation fréquentielle des systèmes linéaires

Si l'on considère la définition des transformées de Fourier directe  $X(\nu) = TF[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2i\pi\nu t} dt$  et inverse  $x(t) = TF^{-1}[X(\nu)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\nu) e^{2i\pi\nu t} d\nu$  associées au signal  $x(t)$ , on constate que la transformée de Fourier  $X(\nu)$  du signal  $x(t)$  correspond à une représentation fréquentielle du signal  $x(t)$  dans la base des exponentielles éternelles  $\{|e(\nu) \rangle\} = \{|e^{2i\pi\nu t} \rangle\}$ , conformément à l'équation **II.2.4**.

Considérons alors la représentation fréquentielle  $X(\nu)$  et  $Y(\nu)$  des deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  et que l'on cherche à exprimer la représentation purement fréquentielle  $A(\nu, \nu')$  du même système  $\mathcal{S}$  :

$$Y(\nu) = \int_{\mathbb{R}} A(\nu, \nu') X(\nu') d\nu'. \quad (\text{II.2.10})$$

On peut également montrer que si le système est stationnaire,

$$A(\nu, \nu') = H(\nu) \delta(\nu - \nu'), \quad (\text{II.2.11})$$

qui donne finalement l'expression suivante :

$$\boxed{Y(\nu) = \int_{\mathbb{R}} H(\nu) \delta(\nu - \nu') X(\nu') d\nu' = H(\nu) X(\nu).} \quad (\text{II.2.12})$$

On obtient alors le résultat classique qui dit que le système  $\mathcal{S}$  peut être représenté dans le domaine spectral par sa fonction de transfert  $H(\nu)$ , et dans le domaine temporel par sa réponse impulsionnelle  $h(t)$ .

### 2.2.3 Interprétation en terme d'invariant du système linéaire

La quantité  $X(\nu)$ , composante du signal  $x(t)$  sur la base des exponentielles éternelles, ne dépend donc pas du temps : c'est donc une constante et un invariant du

système linéaire. Si un opérateur linéaire et stationnaire  $L=(\frac{\partial}{\partial t}; \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \dots)$  agit sur  $x(t)$ , alors :

$$L[x(t)] = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\nu) e^{2i\pi\nu t} d\nu \stackrel{\text{linéarité}}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\nu) \frac{\partial}{\partial t} [e^{2i\pi\nu t}] d\nu, \quad (\text{II.2.13})$$

$$L[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\nu) 2i\pi\nu e^{2i\pi\nu t} d\nu, \quad (\text{II.2.14})$$

si on choisi  $L = \frac{\partial}{\partial t}$ .

On vérifie ainsi que les exponentielles éternelles sont des fonctions propres des opérateurs linéaires. Ces opérateurs laissent invariant les vecteurs de base de la représentation fréquentielle que sont les exponentielles éternelles. Tout l'intérêt de l'analyse fréquentielle des systèmes linéaires consiste à exciter le système en lui appliquant les signaux de base de la représentation fréquentielle que constituent les fonction sinusoïdales. La représentation fréquentielle est donc très commode pour caractériser le système  $S$  car en connaissant l'excitation  $X(\nu)$  et la réponse  $Y(\nu)$ , on en déduit  $H(\nu)$ . Ce résultat est d'autant plus remarquable qu'il ne dépend pas de l'amplitude de l'excitation  $x(t)$ , ce qui concrètement ne nécessite pas de connaissance précise de cette amplitude, ce qui n'est pas le cas pour les systèmes non linéaires.

## 2.3 Signatures non linéaires

La présence de nonlinéarités dans un système nécessite l'introduction de termes supplémentaires dans la représentation temporelle donnée par l'équation II.2.9. Dans le cas de systèmes faiblement non linéaires, des termes associant des convolutions d'ordre supérieur (séries de Volterra) ou l'introduction de bi-spectre dans le domaine fréquentiel (utilisé dans le contexte du CND[29]) peut constituer une bonne approximation. Dans tous les cas, l'expression de la réponse  $y(t)$  nécessite l'introduction d'un terme non linéaire donné par

$$y(t) = NL[x(t)] = N_1 x(t) + N_2 x^2(t), \quad (\text{II.2.15})$$

où  $N_1$  et  $N_2$  sont respectivement le coefficient linéaire et le coefficient non linéaire du second ordre. Si on applique l'excitation  $x(t) = A \cos(2\pi f_0 t)$  des systèmes linéaires, on obtient alors

$$y(t) = N_2 \frac{A^2}{2} + N_1 A \cos(2\pi f_0 t) + N_2 \frac{A^2}{2} \cos(4\pi f_0 t). \quad (\text{II.2.16})$$

La nonlinéarité engendre donc une création de composantes basses fréquences (un niveau continu) et hautes fréquences (harmonique 2). Si l'excitation est bi-fréquence, *i.e.*  $x(t) = A \cos(2\pi f_1 t) + B \cos(2\pi f_2 t)$ , alors la partie non linéaire de la réponse contient des termes supplémentaires en  $f_1 - f_2$  et en  $f_1 + f_2$  enrichissant encore le spectre en

basse et haute fréquence. De façon générale, pour un système complexe possédant possédant plusieurs types de nonlinéarités pouvant être couplées, un mélange de fréquence s'opère et peut donner lieu à un spectre d'intermodulation très riche, surtout vers les basses fréquences. Les termes continus à "fréquence nulle" proviennent du cas particulier où les deux fréquences sont "égales", conduisant alors à des phénomènes de redressement bien connus en optique, électronique, bruit basse fréquence, mais aussi en acoustique par la pression de radiation ou le vent acoustique.

Plusieurs signatures génériques sont systématiquement identifiées :

- des fréquences non présentes en entrée apparaissent en sortie : non invariance des composantes spectrales
- la réponse dépend de l'amplitude d'excitation : absence d'invariance d'échelle et de proportionnalité
- principe de superposition non valable : la dépendance en amplitude n'est qu'un cas particulier du principe de superposition
- opération non commutative pour plusieurs systèmes (Figure 36)

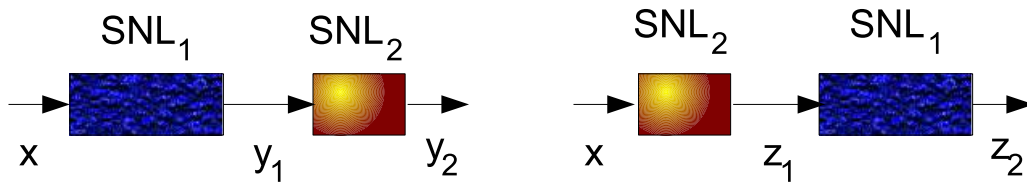


Figure 36 – Non-commutativité de l'algèbre des schémas blocs dans le cas de systèmes non linéaires (SNL) :  $y_2 \neq z_2$

## 2.4 Vers une représentation des systèmes non linéaires

Un certain nombre de travaux ont été réalisés dans le domaine de l'analyse de la dynamique des systèmes non linéaires pour tenter de les décrire à partir d'un formalisme algébrique afin de définir des invariants des systèmes non linéaires, et en utilisant une algèbre d'opérateurs. En effet, de nombreux systèmes non linéaires modélisés par leurs équations non linéaires ont pu être résolus par des changements de variables appropriés qui les transforment en systèmes linéaires. Nous verrons, par exemple, que c'est le cas de l'équation de Burgers qui est transformée en une équation de diffusion et qui de ce fait est traitée classiquement dans le domaine de Fourier. De nombreuses méthodes existent, comme ma méthode des invariants de Riemann utilisée en élasticité non linéaire[83, p. 163] et en acoustique non linéaire[9, p. 105], la méthode des transformations de Bäcklund[3], la méthode de similarité[12], les méthodes de symétries de potentiel[104], la méthode à base des groupe de Lie qui sera développée ici, et la méthode de diffusion inverse IST (Inverse Scattering Transform) utilisant les paires de

Lax, décrite par la figure 37 et qui s'apparente à une analyse spectrale de Fourier pour les systèmes linéaires[4] ; les invariants spectraux étant  $Y(k, 0)$  dans le cas linéaire, et  $\phi(x, 0)$  dans le cas de l'IST. Toute ces méthodes s'appuient sur la présence de loi de conservation.

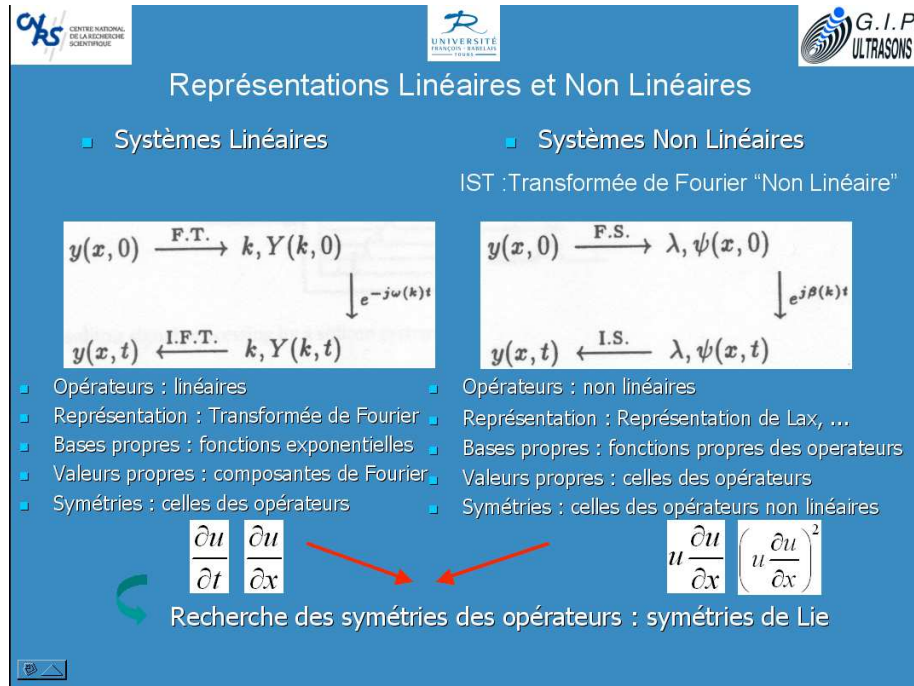


Figure 37 – Représentation spectrale des systèmes linéaires (Fourier) et non linéaire (IST) [39]

Ces méthodes permettent, à partir d'une algèbre d'opérateurs de définir des fonctions propres invariantes par l'actions des opérateurs intervenant dans l'écriture du modèle non linéaire. Ces méthodes ont apporté de nombreux résultats pour certaines équations non linéaires comme KdV[125] pour laquelle des solutions solitons ont pu être confirmées en utilisant le formalisme de Lax. En effet, la resolution de KdV s'obtient par IST en utilisant les opérateurs de Lax  $L, A$  définis par

$$\begin{cases} L = -\frac{\partial^2}{\partial x^2} + u(x, t), \\ A = -4\frac{\partial^3}{\partial x^3} + 6u(x, t)\frac{\partial}{\partial x} + 3\frac{\partial u}{\partial x}. \end{cases} \quad (\text{II.2.17})$$

En constatant que le commutateur  $[L, A]$  vérifie  $[L, A] = 6uu_x - u_{xxx}$  et que  $\frac{\partial L}{\partial t} = [L, A]$ , les valeurs propres  $\lambda_L$  de l'opérateur  $L$  vérifient

$$\begin{cases} L(t)\Psi(x, t) = \lambda_L\Psi(x, t), \\ L(0)\Psi(x, 0) = \lambda_L\Psi(x, 0), \end{cases} \quad (\text{II.2.18})$$

si  $\frac{\partial \lambda_L}{\partial t} = 0$  ; ce qui correspond à la solution de KdV. Les valeurs propres  $\lambda_L$  sont donc des invariants au cours du temps sur la base des fonctions propres  $\Psi(x, t)$ . En excitant



le système par la fonction propre  $\Psi(x, t)$ , il est alors possible, comme pour le cas des excitations sinusoïdales des systèmes linéaires, d'en extraire les invariants. Parmi ces fonctions propres, il se trouve que les solitons sont des solutions de l'équation KdV et sont connues pour posséder un certains nombre de paramètres invariants au cours de leur propagation.

Il existe un autre avantage à utiliser l'approche algébrique de la représentation des systèmes complexes, notamment stochastiques. En effet la résolution de l'équation de Langevin stochastique

$$\ddot{x} + \gamma \dot{x} + f'(x) = \Gamma(t), \quad (\text{II.2.19})$$

où  $\dot{x} = v = \frac{dx}{dt}$ ,  $\gamma$  est un paramètre de dissipation,  $\Gamma(t)$  un bruit blanc gaussien vérifiant

$$\begin{cases} \langle \Gamma(t) \rangle &= 0, \\ \langle \Gamma(t)\Gamma(t') \rangle &= 2\gamma v_{th}^2 \delta(t - t'), \end{cases} \quad (\text{II.2.20})$$

et  $f(x)$  une fonction potentielle pouvant être non linéaire, s'effectue en remplaçant l'étude des variables  $x(t), v(t)$  par l'étude de l'évolution de leur densité de probabilité  $W(x, v, t)$ . C'est ainsi que l'équation ci-dessus est équivalente à l'équation de Fokker-Planck[124]

$$\frac{\partial W(x, v, t)}{\partial t} = L_{FP}W(x, v, t) = \lambda_{FP}W(x, v, t), \quad (\text{II.2.21})$$

où

$$L_{FP} = -\frac{\partial}{\partial x}v + f'(x)\frac{\partial}{\partial v} + \gamma\frac{\partial}{\partial v}\left[v + v_{th}^2\frac{\partial}{\partial v}\right]. \quad (\text{II.2.22})$$

La connaissance des valeurs propres  $\lambda_{FP}$  (invariants temporels) permet alors de déterminer  $W(x, v, t) = W(x, v, t = 0) \exp[-\lambda_{FP}t]$  et ainsi de connaître les moments des variables  $\langle v^n \rangle = \int \tilde{v}^n W(x, \tilde{v}, t) d\tilde{v}$ , les fonctions d'autocorrélations associées, et par l'intermédiaire du théorème de Wiener-Kintchine, les densités spectrales de puissance. L'utilisation d'une algèbre d'opérateurs permet donc également d'aborder ces systèmes complexes (éventuellement non linéaires) par l'intermédiaire d'une quantification stochastique (linéaire).

L'ensemble de ces méthodes permettent de proposer d'autres représentations plus adaptées aux systèmes complexes étudiés par l'intermédiaire d'une algèbre d'opérateurs possédant une grande similitude avec le formalisme de la physique quantique.

En acoustique, la méthode des opérateurs fractionnés[87] est appliquée sur l'équation KZK (Eq. II.2.40) qui permet un découpage spatial des effets de diffraction, de non linéarité et d'atténuation.

## 2.5 Équations de l'acoustique non linéaire

Les équations fondamentales de la propagation acoustique proviennent des hypothèses de conservations qui rendent compte des principes généraux de la physique, et des équations d'état caractéristiques de la nature du milieu de propagation :

- l'hypothèse de conservation de la masse (formulation locale) :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0, \quad (\text{II.2.23})$$

où  $\rho$  est la masse volumique et  $v$  est la vitesse particulaire du milieu.

- le principe de conservation de la quantité de mouvement, représenté, pour un fluide, par sa formulation locale (équation de Navier-Stokes) :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma, \quad (\text{II.2.24})$$

avec le tenseur des contraintes  $\sigma$  donné, par :

$$\nabla \cdot \sigma = -\nabla P + \left( \frac{1}{3}\eta + \xi \right) \nabla (\nabla \cdot v) + \eta \nabla^2 v, \quad (\text{II.2.25})$$

où  $\eta$  et  $\xi$  sont respectivement les coefficients de viscosité de cisaillement et de volume.

- l'hypothèse de conservation de l'énergie :

$$\rho T \frac{Ds}{Dt} = \kappa \nabla^2 T + \xi (\nabla \cdot v)^2 + \frac{1}{2}\eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right), \quad (\text{II.2.26})$$

où  $s$  est l'entropie,  $\kappa$  la conductivité thermique et  $T$  la température.

- l'équation d'état :

$$P = P(\rho, s). \quad (\text{II.2.27})$$

La linéarisation de ces équations conduit à l'équation de propagation acoustique linéaire dans laquelle figure un seul invariant  $c_0$  correspondant à la célérité des ondes dans le milieu de propagation. Un développement perturbatif des variables  $P, \rho, s, v$  par rapport à leurs valeurs au repos peut être fait par rapport au nombre de Mach acoustique sans dimension  $\mathcal{M} = |v|/c_0$ , correspondant au rapport entre deux grandeurs de la dimension d'une vitesse : la vitesse particulaire  $v$  et l'invariant  $c_0$  représentant une célérité, obtenu avec l'hypothèse *a priori* linéaire.

L'équation de propagation non linéaire qui décrit les champs acoustiques d'amplitude finie à l'ordre deux est obtenue en développant les grandeurs caractéristiques du

milieu autour des valeurs au repos (notées avec un indice 0) :  $P = p_0 + p$ ,  $\rho = \rho_0 + \rho'$ ,  $T = T_0 + T'$ ,  $s = s_0 + s'$ ,  $v = v'$ . Les variables  $p, \rho', T', s'$  et  $v'$  représentent respectivement les fluctuations de pression, de masse volumique, de température, d'entropie et de vitesse en ayant supposé que le fluide est au repos. Dans ce cas, on peut alors montrer que, avec  $\nabla \times v' = 0$ , on obtient l'équation de propagation non linéaire quadratique en pression sous la forme obtenue par Aanonsen *et al.* [1] :

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\vartheta}{c_0^4} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = -\frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} - \left( \nabla^2 + \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathcal{L}, \quad (\text{II.2.28})$$

où la diffusivité du son  $\vartheta$ , regroupant les effets visqueux et thermiques (atténuation), est introduite par :

$$\vartheta = \frac{1}{\rho_0} \left[ \left( \frac{4}{3} \eta + \zeta \right) + \kappa \left( \frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \right], \quad (\text{II.2.29})$$

et la densité Lagrangienne  $\mathcal{L}$  est donnée par

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \rho_0 v'^2 - \frac{p^2}{2 \rho_0 c_0^2}. \quad (\text{II.2.30})$$

Les deux termes de droite de l'équation II.2.28 décrivent les effets non linéaires cumulatifs ( $-\frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2}$ ) ou locaux ( $(\nabla^2 + \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}) \mathcal{L}$ ). Les contributions non linéaires locales[10] sont représentées par le second terme de l'équation d'Annonsen provenant de la loi de conservation de la masse et l'équation de Navier-Stokes (formulation locale). Le coefficient non linéaire  $\beta$ , défini par

$$\beta = 1 + \frac{B}{2A}, \quad (\text{II.2.31})$$

est obtenu avec  $\frac{B}{A} = \frac{\rho_0}{c_0^2} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right)_{s,0}$  provenant du développement perturbatif de la pression donnée par l'équation d'état par rapport à  $\mathcal{M} = \frac{\rho'}{\rho_0} = \frac{v}{c_0}$  dans le cas linéaire :

$$p = P - P_0 = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{s,0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2!} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial \rho^2} \right)_{s,0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots, \quad (\text{II.2.32})$$

$$p = P - P_0 = A \left( \frac{\rho'}{\rho_0} \right) + \frac{B}{2!} \left( \frac{\rho'}{\rho_0} \right)^2 + \dots, \quad (\text{II.2.33})$$

Le paramètre  $\beta$  résulte de la contribution de deux effets cumulatifs :

- la non-linéarité thermodynamique due à l'équation d'état
- convection liée à l'entraînement du fluide lors de la propagation de l'onde. Ce terme ne dépend pas du milieu de propagation et est présent quelque soit sa complexité.

Compte tenu de cette définition, les valeurs observées et mesurées depuis que sont effectuées des expériences en acoustique non linéaire donnent un paramètre  $\beta$  (en valeur absolue) maximum de 30[23]. Toute valeur située au delà de cette limite relève de comportements "non classique" (cf partie 3.5.1), ou de milieux non homogènes comme les milieux à bulles qui nécessitent souvent la définition d'un "paramètre non linéaire effectif" masquant la propriété d'hétérogénéité du milieu considéré. Dans le cas des bulles, cette approche peut alors se révéler insuffisante dans la mesure où l'essentiel des comportements non linéaire est situé au niveau des inclusions molles que constituent les bulles. Cet effet a très bien été mis en évidence dans les solides par Vladimir Zaitsev *et al* [142, 143].

### 2.5.1 Conditions *a priori* d'analyse

La simplification de l'équation d'Annonsen nécessite la prise en compte d'hypothèses que l'on appelle condition *a priori* d'analyse. Cette appellation permet de mettre en évidence le fait que, contrairement aux systèmes linéaires, il est nécessaire d'introduire des notions d'échelle, intrinsèquement liées à l'hypothèse du développement perturbatif (II.2.32).

#### Équations de Westervelt et Burgers

Dans le cas d'un champ lointain où les ondes ont un comportement local de type "ondes planes", les termes locaux deviennent négligeables par rapport aux termes cumulatifs. Si les hypothèses précédentes sont conservées (milieux homogènes, absence d'interface), nous pouvons considérer que nous sommes en hypothèses d'ondes planes. Le problème peut donc se simplifier en un problème uni-dimensionnel (propagation suivant  $z$ ) décrit par l'équation de Westervelt[138]

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\vartheta}{c_0^4} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = -\frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2}, \quad (\text{II.2.34})$$

qui peut se simplifier en

$$\left[ \frac{\partial}{\partial z} - \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\vartheta}{2c_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial}{\partial t} \right] \left[ \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\vartheta}{2c_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial}{\partial t} \right] p = 0, \quad (\text{II.2.35})$$

où, de façon plus algébrique :

$$\mathcal{O}_- \mathcal{O}_+ p = 0, \quad (\text{II.2.36})$$

où chaque opérateur  $\mathcal{O}_-$  et  $\mathcal{O}_+$  représente un opérateur de propagation respectivement vers les  $z$  négatif et positif. Si l'on cherche des solutions propagatives dans le

sens des  $z > 0$ , il suffit alors (avec le changement  $\tau = t - z/c_0$ ) de résoudre l'équation de Burgers :

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{c_0} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\vartheta}{2c_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p \frac{\partial p}{\partial t} = 0. \quad (\text{II.2.37})$$

### Équation KZK

La prise en compte des considérations expérimentales d'excitation ultrasonore réalisées à partir de transducteurs directifs ou faiblement focalisés nécessite l'introduction des effets de diffraction des sources. La prise en compte des effets de diffraction permet une simplification de l'équation d'Aanonsen en exploitant le comportement multi-échelles de la propagation : la propagation suivant  $x$  et  $y$  (diffraction) est d'un ordre de grandeur plus petit (ordre  $\sqrt{\zeta}$ ) que celle en  $z$  (ordre  $\zeta$ ). Ainsi, en cherchant une solution sous la forme

$$p_z = \zeta p_z(\tau, x', y', z'), \quad (\text{II.2.38})$$

$$p_{x,y} = \zeta \sqrt{\zeta} p_{x,y}(\tau, x', y', z'), \quad (\text{II.2.39})$$

avec

$$\tau = t - \frac{z'}{c_0}, \quad z' = \zeta z, \quad x' = \sqrt{\zeta} x, \quad y' = \sqrt{\zeta} y,$$

on obtient l'équation KZK [140, 141, 84] :

$$\frac{\partial p^2}{\partial z \partial \tau} = \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p + \frac{\vartheta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2}, \quad (\text{II.2.40})$$

qui décrit le comportement de champs acoustiques pour de nombreuses applications : hydroacoustique, médicales, caractérisation biologique de tissus[144], lithotripteurs[7], propagation du son dans un milieu turbulent[11]. La plupart des calculs de champs acoustiques sont effectués dans le système de coordonnées adapté au champs diffracté (le "repère du champs") par une méthodes de superposition de champs gaussiens.

### Équation TBE

Si l'on souhaite suivre l'évolution de la diffraction du champs lointain dans le "repère du champs", il est alors plus commode d'utiliser le changement de variable suivant :

$$P = (1 + \sigma) \frac{p}{p_0}; u = \frac{r}{a} \frac{1}{1 + \sigma}; \sigma = \frac{z}{r_0}; \tau' = \omega \tau - \frac{r^2}{a^2} \frac{1}{1 + \sigma}, \quad (\text{II.2.41})$$

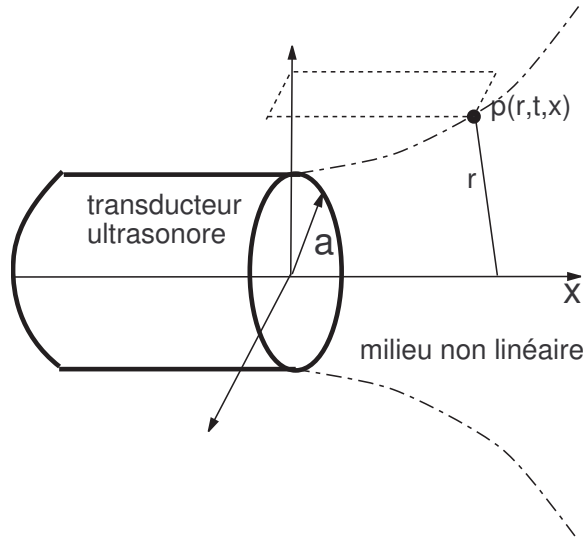


Figure 38 – Dispositif expérimental de caractérisation non linéaire d'un milieu par excitation ultrasonore axisymétrique

qui permet de transformer l'équation KZK en l'équation TBE[69]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial \sigma \partial \tau'} = \frac{1}{4(1+\sigma)^2} \nabla_{\perp}^2 P + \alpha r_0 \frac{\partial^3 P}{\partial \tau'^3} + \frac{r_0}{2l_s(1+\sigma)} \frac{\partial^2 P^2}{\partial \tau'^2}, \quad (\text{II.2.42})$$

où  $l_s = \frac{\rho_0 c_0^3}{\beta p_0 \omega}$  est la distance de choc pour une onde plane. Nous verrons que le changement de variables (non trivial) possède un sens physique pouvant être retrouvé par des considérations de symétries (voir partie 3.3.3).

### Équation KZ

En considérant l'atténuation négligeable ( $\vartheta = 0$ ) l'équation KZK (Eq.II.2.40) devient alors l'équation KZ

$$\frac{\partial p^2}{\partial z \partial \tau} = \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2}. \quad (\text{II.2.43})$$

Si on suppose que l'excitation ultrasonore est réalisée à partir d'un transducteur axisymétrique de rayon  $a$  (Figure 38), on peut alors montrer que KZ peut s'écrire sous la forme d'une équation adimensionnelle en variable normalisées  $r, \theta, z$  :

$$KZ(r, \theta, z) \equiv Nu_{\theta\theta}^2 - u_{\theta z} + u_{rr} + \frac{1}{r} u_r = 0, \quad (\text{II.2.44})$$

où  $u = \frac{p}{u_0}$  est la pression longitudinale (proportionnelle à la vitesse particulière dans l'approximation parabolique) normalisé à  $u_0 = \frac{p_0}{\rho_0 c_0}$ ,  $z = \frac{x}{4l_d}$  est la distance axiale normalisée à la longueur de diffraction de Rayleigh  $l_d = \frac{ka^2}{2}$ , et  $\theta = \omega(t - x/c_0)$  est le

temps normalisé dans le repère de l'onde. Le coefficient non linéaire normalisé  $N = \frac{2l_d}{l_s}$  représente le rapport entre les effets de diffraction et non linéaire (quantifié par la distance de choc  $l_s = \frac{c_0^2}{\beta \omega u_0}$ ), la célérité  $c_0$  étant prise à l'équilibre et  $\beta$  étant le paramètre non linéaire du milieu de propagation.

Des solutions exactes[85] existent et s'expriment par :

$$u(r, \theta, z) = \frac{c}{1 - 4iz(1 - ib)} \exp \left[ iT(r, \theta, z) - (1 - ib) \frac{r^2}{1 - 4iz(1 - ib)} \right] \quad (\text{II.2.45})$$

$$T(r, \theta, z) = \theta + Nu(r, \theta, z) \frac{1 - 4iz(1 - ib)}{-2i(1 - ib)} \ln \left( 1 - 4iz(1 - ib) \right), \quad (\text{II.2.46})$$

où  $T(r, \theta, z)$  est appelé le "temps retardé non linéaire",  $b$  and  $c$  étant des constantes dépendantes des conditions initiales. Les méthodes utilisées par Lapidus et Rudenko permettent de transformer, sous certaines conditions d'excitation, KZ en une équation linéaire, en utilisant de nouvelles variables judicieuses, notamment une variable  $T(r, \theta, z)$  qui est une généralisation du cas  $T = \theta + zu$  utilisée lors de l'étude de la propagation d'une onde plane dans un conduit de section variable. Plusieurs années plus tard, Tjøtta[131] généralisa la méthode et formula une classe plus générale de solutions décrivant la propagation non linéaire d'ondes sphériques. Ces solutions sont exprimées à partir de l'équation de Burgers sphérique et s'écrivent :

$$\bar{u}(r, \theta, z) = \bar{u}(T_s) = \frac{z_0}{z + z_0} v^*(T_s), \quad (\text{II.2.47})$$

avec

$$T_s = \theta_s + v^*(T_s) \frac{z + z_0}{z_0} \ln \frac{z + z_0}{z_0}, \quad (\text{II.2.48})$$

et

$$\theta_s = \theta - \frac{r^2}{4(z + z_0)}, \quad (\text{II.2.49})$$

où  $v^*(T_s)$  est une condition aux limites données par

$$u(r, \theta, 0) = u(r, \theta) = v^*\left(\theta - \frac{r^2}{4z_0}\right). \quad (\text{II.2.50})$$

La solution (II.2.45) est alors obtenue par

$$v^*(\theta_s) = C \exp(i\theta_s), \quad (\text{II.2.51})$$

$$z_0 = -\frac{N}{2i(1 - ib)}. \quad (\text{II.2.52})$$

L'équation KZ continue à être l'objet de nombreuses études dans la communauté acoustique non linéaire[70, 82], notamment dans le cadre, entre autres, de l'étude des ondes de chocs dans les milieux fluides hétérogènes[30].

Les différentes équations non linéaires KZ, KZK, TBE, Burgers, Westervelt permettent de traiter la plupart des cas rencontrés pour étudier la propagation dans les milieux homogènes. Elles sont établies à partir d'un développement perturbatif des variables acoustiques qui tient compte également des conditions *a priori* d'analyse, liées aux propriétés du système (présence d'atténuation, fluide, solide, champ lointain, conditions aux limites, présence d'interfaces). Les changements de variables effectués pour leur résolution ne sont pas triviaux. L'analyse de la symétrie des équations qui rend compte de la symétrie du problème physique (présentée en partie 3.2) permet d'apporter une réponse sur la manière systématique d'obtenir ces nouvelles variables et d'en comprendre leur origine intrinsèque.

### 2.5.2 Conditions *a priori* d'excitation

Contrairement aux conditions *a priori* d'analyse, les conditions *a priori* d'excitation ne concerne que la procédure dont le milieu est acoustiquement excité.

#### Génération d'harmoniques

En effectuant un développement perturbatif de l'équation (II.2.37) en pression  $p(z, \tau) = \mathcal{M}p^{(1)}(z, \tau) + \mathcal{M}^2p^{(2)}(z, \tau)$ , une solution monochromatique s'écrivant  $p^{(1)}(z = 0, \tau) = p_0 \cos(\omega\tau)$  impose, pour la perturbation  $p^{(2)}$ , de vérifier l'équation

$$\frac{\partial p^{(2)}}{\partial z} - \frac{\vartheta}{2c_0} \frac{\partial^2 p^{(2)}}{\partial \tau^2} = \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p^{(1)} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial \tau}, \quad (\text{II.2.53})$$

donnant, dans le cas des grandes distances de propagation, la solution :

$$p^{(2)}(z, \tau) = \beta p_0^2 z \frac{k}{\rho_0 c_0^2} \sin(2\omega\tau), \quad (\text{II.2.54})$$

qui confirme la création d'harmonique à la fréquence double  $2\omega$ , le caractère cummulatif de la génération d'harmonique (proportionnalité en  $z$ ) et la dépendance quadratique en fonction de l'amplitude  $p_0^2$ , signature de la nonlinéarité dite classique.

#### Interaction paramétrique de deux ondes ultrasonores

Pour une excitation bi-fréquence

$$p^{(1)}(z = 0, t) = p_{01} \cos(\omega_1 t) + p_{02} \cos(\omega_2 t), \quad (\text{II.2.55})$$



le terme secondaire créé  $p^{(2)}$  contient 4 termes d'intermodulation aux fréquences  $2f_1$ ,  $2f_2$ ,  $f_2 \pm f_1$ . De même que pour les composantes harmoniques, les termes d'intermodulation  $p_{\pm}^{(1)}(z=0, t)$  s'écrivent

$$p_{\pm}^{(2)} = \beta p_{01} p_{02} z \frac{k_{\pm}}{\rho_0 c_0^2} \sin(\omega_{\pm} t), \quad (\text{II.2.56})$$

avec  $\omega_{\pm} = \omega_1 \pm \omega_2$  et  $k_{\pm} = k_1 \pm k_2$ .

Dans le cas particulier où l'on a  $\omega_1 \gg \omega_2$ , Zverev et Galachev[145] ont montré que cette interaction paramétrique conduisait à un processus de modulation de phase. En effet, si une onde ultrasonore haute fréquence sonde ( $\omega_{hf}$ ) se propageant dans un matériau de coefficient non linéaire  $\beta$  et dans lequel une onde ultrasonore basse fréquence pompe ( $\omega_{bf}$ ) se propage également et de façon colinéaire (Fig.39), la pression  $p'_{hf}$  s'écrit

$$p'_{hf} = p_{hf} \cos \left( \omega_{hf} t - \vec{k}_{hf} \cdot \vec{u}_{hf} \right) = p_{hf} \cos \left( \omega_{hf} t - \phi_{hf} \right), \quad (\text{II.2.57})$$

où  $\vec{k}_{hf}$  est le vecteur d'onde et  $\vec{u}_{hf}$  est le vecteur unitaire de la propagation HF. De même, la pression BF s'exprime par

$$p'_{bf} = p_{bf} \cos \left( \omega_{bf} t - \vec{k}_{bf} \cdot \vec{u}_x \right). \quad (\text{II.2.58})$$

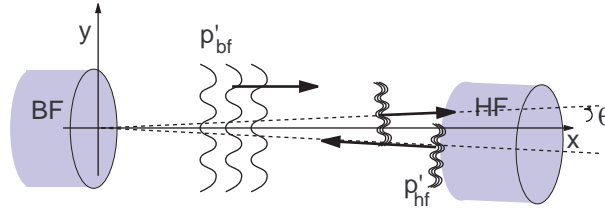


Figure 39 – Interaction paramétrique entre deux ondes ultrasonores. Ici, l'onde HF est émise dans la direction opposée  $-x$  et l'effet paramétrique commence lorsque l'on synchronise la réflexion de la HF à la surface du transducteur BF et l'émission du pulse BF.

Si  $\omega_{hf} \gg \omega_{bf}$ , les effets non linéaires de l'interaction paramétrique engendrent une modification de la célérité  $c_{hf}$  dans le milieu, par la présence de l'onde pompe BF, et sous la forme de deux contributions cumulatives proportionnelles au paramètre  $\beta$  du milieu :

$$c_{hf} = c_0 + \Delta c(x, t) = c_0 + \frac{\beta}{\rho_0 c_0} \cos \left( \omega_{bf} t - k_{bf} x \right). \quad (\text{II.2.59})$$

Dans des hypothèses d'ondes planes, la phase  $\phi_{hf}$  s'obtient par intégration sur la distance d'interaction  $d$  (distance entre les transducteurs ultrasonores) :

$$\phi_{hf} = \int_0^d \frac{\omega_{hf}}{c_{hf}(x, t)} dx, \quad (\text{II.2.60})$$

et en supposant  $\Delta c(x, t) \ll c_0$ , il vient alors :

$$\phi_{hf} = \frac{\omega_{hf}d}{c_0} - \int_0^d \frac{\omega_{hf}}{c_0^2} \Delta c(x, t) dx = \phi^L - \Delta\phi^{NL}, \quad (\text{II.2.61})$$

où  $\phi^L$  s'identifie à la phase de la propagation linéaire et où  $\Delta\phi^{NL}$  est donné par

$$\Delta\phi^{NL} = \Delta\phi_0 \cos \left[ \omega_{bf} \left( t - \frac{d}{c_0} \right) \right], \quad (\text{II.2.62})$$

et le taux de modulation de phase  $\Delta\phi_0$  donné par

$$\Delta\phi_0 = \frac{[1 + \gamma]\omega_{hf}p_{bf}d}{2\rho_0c_0^3} = \frac{d\omega_{hf}v_{bf}}{c_0^2}\beta. \quad (\text{II.2.63})$$

Le paramètre  $\beta$  est alors proportionnel au rapport  $\frac{\Delta\phi_0}{v_{bf}}$  qu'il faut tenter d'évaluer. Comme pour le cas de la génération d'harmonique, la signature non linéaire est cumulative sur la distance de propagation ( $d$ ) et dépend de l'amplitude d'excitation de la pompe ( $v_{bf}$ ). Cette méthode constitue le cœur de la méthode expérimentale de modulation de phase présentée en partie 1.4.3.

### Propagation unipolaire en milieu hystérétique

D'autres conditions *a priori* d'excitation permettent de simplifier les équations de l'acoustique non linéaires, notamment des conditions de type impulsionnelle. C'est dans les milieux hystérétiques (cf partie 3.5.1) que ces hypothèses sont le plus souvent utilisées. En effet, la présence d'un effet mémoire complique l'analyse de la propagation dans ces milieux non linéaires dits "non classiques", et il est bien souvent utile de forcer l'unicité des états physiques décrit lors de l'excitation unipolaire.

L'équation de propagation unidimensionnelle d'une onde plane suivant  $x$  est donnée par

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad (\text{II.2.64})$$

où  $\rho_0$  est la densité à l'équilibre,  $v = \frac{\partial u}{\partial t}$  la vitesse particulière,  $\sigma$  est la contrainte associée à l'onde acoustique. Si on suppose que  $\sigma = \sigma_s + \sigma_{p_0}p_0'$  où  $p_0$  est un paramètre décrivant la propriété hystérétique du milieu, avec

$$\sigma_s = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial s} \right)_{p_0}, \text{ and } \sigma_{p_0} = \left( \frac{\partial \sigma}{\partial p_0} \right)_s, \quad (\text{II.2.65})$$

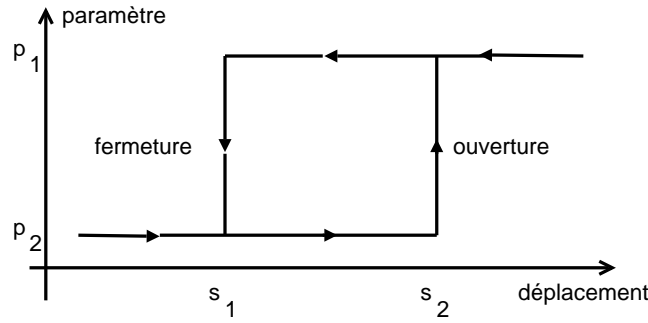


Figure 40 – Paramètre d'ouverture et de fermeture d'un élément hystérétique élémentaire simple possédant deux états possibles : ouvert et fermé. Les flèches indiquent la direction de variation du déplacement  $s$

et  $s = \frac{\partial u}{\partial x}$  le déplacement associé à l'onde acoustique, et que l'on utilise l'approche basée sur les espaces de Preisach-Mayergoyz (PM)[97, 92, 67, 93], on peut alors supposer que

$$\sigma_{p_0} p_0' = \sigma_{p_0} p_s(s, s_c) s, \quad (\text{II.2.66})$$

où la sensibilité  $p_s(s, s_c) = \frac{\partial p_0}{\partial s}$  est une fonction linéaire de  $s$  et d'une valeur caractéristique  $s_c$  du déplacement. Dans ce cas, l'équation d'onde s'écrit alors

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \sigma_s \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \sigma_{p_0} p_s \left( \frac{\partial u}{\partial x}, \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_c \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (\text{II.2.67})$$

En utilisant une méthode multi-échelles des amplitudes lentement variables, l'équation de propagation (II.2.67) devient :

$$\frac{\partial s}{\partial x} - \frac{1}{2c_0} \left( \frac{\sigma_{p_0}}{\sigma_s} \right) p_s[s, s_c] \frac{\partial s}{\partial \tau} = 0, \quad (\text{II.2.68})$$

où  $\tau = t - x/c_0$  est le temps retardé et  $c_0 = \sqrt{\sigma_s/\rho_0}$  est la célérité à l'équilibre adiabatique.

De façon générale, le paramètre  $p_s[s, s_c]$  associé au milieu hystérétique est évalué à partir d'une superposition de contribution individuelle de chaque unité hystérétique élémentaire (UHE) donnée par (voir partie 3.5.1)

$$p_0(s) = \int_{-\infty}^{s_2} ds_1 \int_{s_1}^{+\infty} ds_2 p_0(s, s_1, s_2) \rho_{PM}(s_1, s_2), \quad (\text{II.2.69})$$

où  $\rho_{PM}(s_1, s_2)$  est la fonction de distribution de l'UHE avec les propriétés  $s_1, s_2$  dans l'espace PM (Figure 40).

La prise en compte de condition *a priori* d'excitation consiste à supposer que la contrainte ne peut prendre qu'un seul maximum  $\sigma_{max}$  et qu'un seul minimum  $\sigma_{min}$ . Dans ce cas, l'équation de propagation s'écrit[108]

$$\frac{\sigma}{\rho_0 c_0^2} = s - \frac{h}{2} \left[ s(s_{max} - s_{min}) + (s - s_{max})(s - s_{min}) \text{sign} \left( \frac{\partial s}{\partial t} \right) - s_{max} s_{min} \text{sign} \left( \frac{\partial s}{\partial t} \right)_{\sigma=0, s=0} \right], \quad (\text{II.2.70})$$

où  $h$  est le paramètre caractéristique de la propriété de l'hystérésis avec  $h > 0$  si l'hystérésis est dissipatif.

La simplification du problème peut passer par une nouvelle hypothèse concernant l'excitation en supposant que celle-ci est de type compression unipolaire, *i.e.*  $s < 0$ ,  $s_{max} = 0$ , et  $s_{min}$  est unique. La combinaison des équations II.2.70 et II.2.64 donne en variable  $u = -c_0 s$  et  $v$  [108, 100] :

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{h}{2c_0^2} v \frac{\partial v}{\partial \tau} = 0, \quad \text{si } \frac{\partial s}{\partial \tau} > 0, \quad (\text{II.2.71})$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{h}{2c_0^2} (v_{max} - v) \frac{\partial v}{\partial \tau} = 0, \quad \text{si } \frac{\partial s}{\partial \tau} < 0. \quad (\text{II.2.72})$$

En normalisant les variables  $V \equiv v/v_0$  par  $v_0 = v_{max}(x = 0)$ , ( $\theta \equiv \tau/\tau_0$ ),  $x_{NL} = 2c_0^2 \tau_0 / h v_0$  et  $\xi = x/x_{NL}$ , le système (II.2.71-II.2.72) devient :

$$\frac{\partial V}{\partial \xi} + V \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0, \quad \text{si } \frac{\partial V}{\partial \theta} > 0, \quad (\text{II.2.73})$$

$$\frac{\partial V}{\partial \xi} + (V_M - V) \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0, \quad \text{si } \frac{\partial V}{\partial \theta} < 0, \quad (\text{II.2.74})$$

où  $V_M = v_{max}/v_0$ . Ce système fortement non linéaire a été étudié par un certain nombre d'auteurs et des solutions exactes ont été formulées, malgré la présence de la condition sur  $\frac{\partial V}{\partial \theta}$  et surtout de l'effet mémoire traduit par  $V_M = V_M(\xi)$  qui représente le maximum de la solution  $V_M(\xi, \theta)$  défini par  $\left( \frac{\partial V}{\partial \theta} \right)_{V=V_M} = \left( \frac{\partial V}{\partial \xi} \right)_{V=V_M} = 0$ , et qui se doit, compte tenu des hypothèses *a priori*, d'être unique pour respecter les conditions d'excitation du milieu exploré.

### 2.5.3 Conséquences en acoustique non linéaire

Les différentes équations de l'acoustique non linéaire dans les milieux complexes (fluide, solide, milieux hystérétiques) présentées ci-dessus sont nécessaires pour les applications concrètes présentées en partie 1. D'un point de vue plus formel, le fait que les équations utilisent les mêmes approches de simplifications (méthodes multi-échelles en espace et en temps), incluant éventuellement les hypothèses sur les conditions initiales, m'a poussé à me demander si il existait une méthode plus systématique pour trouver les changements de variables permettant de simplifier, voire linéariser le problème afin le rendre facilement analysable théoriquement et par l'utilisation des outils numériques utilisant les méthodes spectrales classiques.

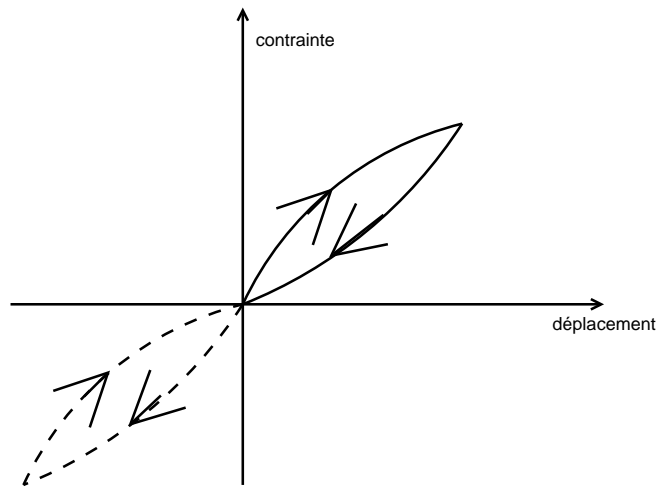


Figure 41 – Relation contrainte-déplacement hystérétique résultant de toutes les contributions individuelles de chaque UHE. Les flèches indiquent les variations de déplacement au cours de l'excitation

## 2.6 Simulations de la propagation non linéaire

L'analyse des systèmes non linéaires par simulation numérique pose un problème intrinsèque sur la validité de la simulation : stabilité, précision et conséquences sur le principe de superposition des calculs par différences finies. L'hypothèse de base de la discrétisation temporelle et spatiale des variables consiste à supposer que les pas temporels et spatiaux sont suffisamment petits pour supposer une évolution lente des variables de simulation représentant les phénomènes physiques. Compte tenu des effets présentés en partie 2.5.2 montrant la génération de phénomènes plus rapides temporellement (harmoniques) ou spatialement (création de longueurs inférieures (ou sub-lambda) à la longueur d'onde  $\lambda$  de d'excitation), de phénomènes cumulatifs pouvant conduire à une instabilité spatiale ou temporelle (termes séculaires), il devient nécessaire de diminuer les pas de discrétisation conduisant à un besoin en ressources informatiques de simulation sans cesse plus importantes, d'autant plus importantes qu'il est également nécessaire d'augmenter les temps de simulation afin de tenir compte des phénomènes lentement variables, autre signature caractéristique des systèmes non linéaires.

De nombreuses approches ont été introduites afin de faciliter le traitement numériques de tels systèmes. Il semble toutefois indispensable de maintenir la description temporelle, associée à une séparation des effets physiques comme c'est le cas des méthodes des opérateurs fractionnés ou des méthodes pseudo-spectrales[16, 107] utilisées au LUSI depuis 1998.

### 2.6.1 Stratégie du maintien de l'approche temporelle

Le fait de travailler sur des effets non linéaires ne laissant pas invariants la représentation spectrale impose donc un retour à une représentation temporelle des phénomènes physiques. Ceci explique en outre le fait que le retour à l'implémentation d'algorithmes numériques préservant le domaine temporel sont préférés aux algorithmes travaillant dans l'espace réciproque de Fourier. C'est ainsi qu'au LUSI, il a été choisi d'implémenter à partir de 1998 des algorithmes travaillant dans le domaine purement temporel[106] utilisant la méthode des opérateurs fractionnés, puis la méthode pseudo-spectrale développée dans les années 70[59], appliquée pour la propagation d'ondes élastiques[56]. Implantée dans l'équipe par Olivier Bou Matar et Jean-Pierre Remenieras, elle a été étendue au cas des solides aux propriétés hystéretiques dans le cadre de la Thèse de Thomas Goursolle.

Dans le but d'étudier les phénomènes acoustiques non linéaires, décrits dans la section précédente, un outil permettant de simuler la propagation d'une onde ultrasonore dans un solide ou un fluide sur une longue distance a été développé au sein du laboratoire, en prenant en compte aussi bien l'atténuation et la dispersion que les effets non linéaires. Les méthodes habituelles de simulations telles que les éléments finis ou les différences finies ne permettent pas d'étudier la propagation sur un domaine de géométrie complexe de grande dimension (une centaine de longueurs d'onde), avec un temps de simulation et une précision satisfaisants, ce qui nous a conduit à privilégier la méthode pseudo-spectrale.

### 2.6.2 Simulations numériques TR-NEWS et NEWS-TR

Cette partie a été effectuée en collaboration avec Samuel Callé et Olivier Bou Matar dans le cadre du WP2 du projet AERONEWS. L'extension 3D du code de propagation a été développée et présentée dans le cadre de la Thèse de Thomas Goursolle. L'ensemble de cette partie simulation sur TR-NEWS et NEWS-TR a constitué l'objet de publications[63, 62, 64, 66, 61] et collaborations avec les membres du projet AERONEWS[18, 119, 20, 132, 14, 15, 86, 107].

Le principe de fonctionnement de l'algorithme de simulation numérique s'inspire de l'analyse IST présentée en figure 37, particulièrement préconisée pour l'analyse de la dynamique des systèmes non linéaires complexes. Cet algorithme effectue une résolution de l'évolution spatiale de la variable  $y(x, t)$  en passant dans le domaine de Fourier spatial  $Y(k, t)$  dans lequel l'évolution temporelle est évaluée en  $\Delta t$  ( $Y(k, t + \Delta t)$ ) avant retour dans le domaine spatial  $y(x, t + \Delta t)$  par transformée inverse. Concrètement, le calcul des dérivées spatiales s'effectue par la relation suivante :

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial x} = \text{FFT}^{-1} \left[ \left( ik_x e^{\pm ik_x \frac{\Delta x}{2}} \cdot \text{FFT} [y(x, t)] \right) \right], \quad (\text{II.2.75})$$

où  $\text{FFT}^{-1}$  est la transformée de Fourier rapide inverse,  $k_x$  est le nombre d'onde dans la direction  $x$  et  $\Delta x$  est le pas spatial de la grille de propagation numérique dans cette même direction. Enfin, on reste dans le domaine temporel pour le calcul des dérivées temporelles ( $\partial g / \partial t = y(t, g(t))$ ) en utilisant un schéma explicite d'Adams-Bashforth d'ordre 4 :

$$g(t + \Delta t) = g(t) + \frac{\Delta t}{24} \left( 26g \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - 5g \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) + 4g \left( t - \frac{3\Delta t}{2} \right) - g \left( t - \frac{5\Delta t}{2} \right) \right). \quad (\text{II.2.76})$$

Dans le cas d'une simulation non linéaire où des harmoniques sont générés, la diminution d'un facteur 5 peut être obtenue pour le nombre nécessaire de points par longueur d'onde. Le domaine de simulation 2D, défini dans le cadre du projet AERO-NEWS, correspond à un matériau solide isotrope dont les paramètres standards sont donnés en figure 42. Plusieurs positions de défauts ont été étudiées et chaque défaut est caractérisé par une nonlinéarité non classique de type hystérétique présentée en partie 3.5.1.

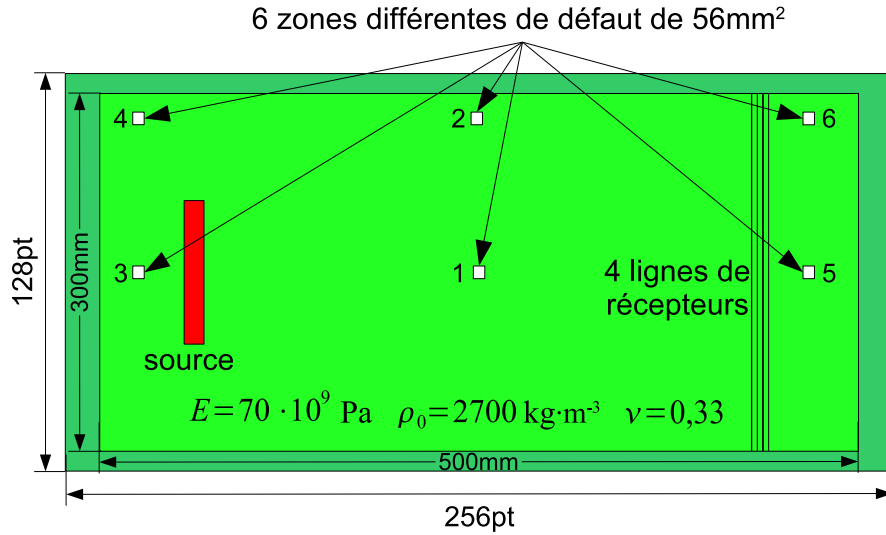


Figure 42 – Domaine de simulation de l'analyse numérique de NEWS-TR : solide isotrope excité par une source apodisée. La signature non linéaire est extraite par inversion d'impulsion, retournée et renvoyée dans le domaine par les 4 lignes de récepteurs qui deviennent alors émetteurs

Les paramètres de simulation sont regroupés dans le tableau 3. L'excitation est localisée sur la source et est de la forme  $e(x, z, t)$  :

$$e(x, z, t) = \pm p_0 \cdot \sin(2\pi f_c t) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t}{s\chi} \right)^2} \left( 1 - e^{-\left( \frac{t}{s\chi} \right)^2} \right) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-x_s}{\chi x} \right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{z-z_s}{\chi z} \right)^2}, \quad (\text{II.2.77})$$



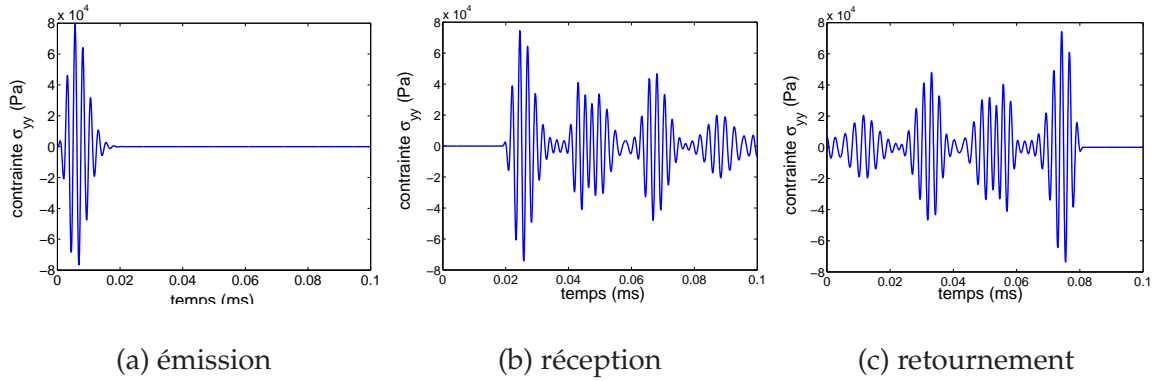


Figure 43 – Excitation temporelle émis dans le domaine de simulation (a) et reçu en un point d’une ligne de réception (b) et temporellement retourné (c)

où  $f_c$  est la fréquence centrale de l’onde émise,  $p_0$  la pression acoustique initiale,  $\chi$  et  $s_\chi$  les coefficients d’apodisation temporelle,  $\chi_x$  et  $\chi_z$  les coefficients d’apodisation spatiale suivant  $x$  et  $z$ , et  $x_s$  et  $z_s$  les coordonnées du centre de la source suivant  $x$  et  $z$ .

Les signaux émis, reçus et retournés sont présentés en figure 43. Afin de visualiser les zones de rétrofocalisation, on détermine le maximum des contraintes  $\sigma_{yy}$  pour chaque point du domaine. La composante non linéaire est extraite par filtrage classique ou inversion d’impulsion et est renvoyée par les récepteurs fonctionnant alors en émetteur dans le cas de ma méthode NEWS-TR. La méthode NEWS-TR est validée car la composante non linéaire est rétrofocalisée sur la seule source de nonlinéarité présente au niveau du défaut (Figure 44). Ces simulations valident également la meilleure efficacité de la méthode d’inversion d’impulsion ; celle-ci supprimant totalement la partie linéaire, alors que le filtrage classique ne supprime pas la partie haute fréquence de la réponse linéaire large bande. La rétrofocalisation sur la source mise en évidence par la figure 44d donne une mesure de la sensibilité de la méthode NEWS-TR et laisse entrevoir la difficulté de mise en œuvre expérimentale, mais confirme la nécessité de privilégier la méthode d’inversion d’impulsion.

L’extension 3D des simulations NEWS-TR et TR-NEWS (Figure 45) a été effectuée au cours de la Thèse de Thomas Goursolle en utilisant un changement de variables basé sur le formalisme de Kelvin[32] qui permet de transformer le domaine hystérique 3D en six espaces PM orthogonaux et indépendants. Cette méthode a permis de généraliser le formalisme des espaces PM au cas des milieux complexes 3D. Il s’agit du premier code de propagation non linéaire 3D de la méthode NEWS-TR (retournement sur la signature non linéaire) présentée en figure 46, de la méthode TR-NEWS (réciprocité figure 52) permettant de prendre en compte des nonlinéarités non classiques, et le principe de retournement temporel classique sur la source (Figure 46).

La démarche adoptée en terme de simulation a donc privilégié plusieurs points :

- le maintien de l’approche temporelle par l’utilisation de codes pseudo-spectraux

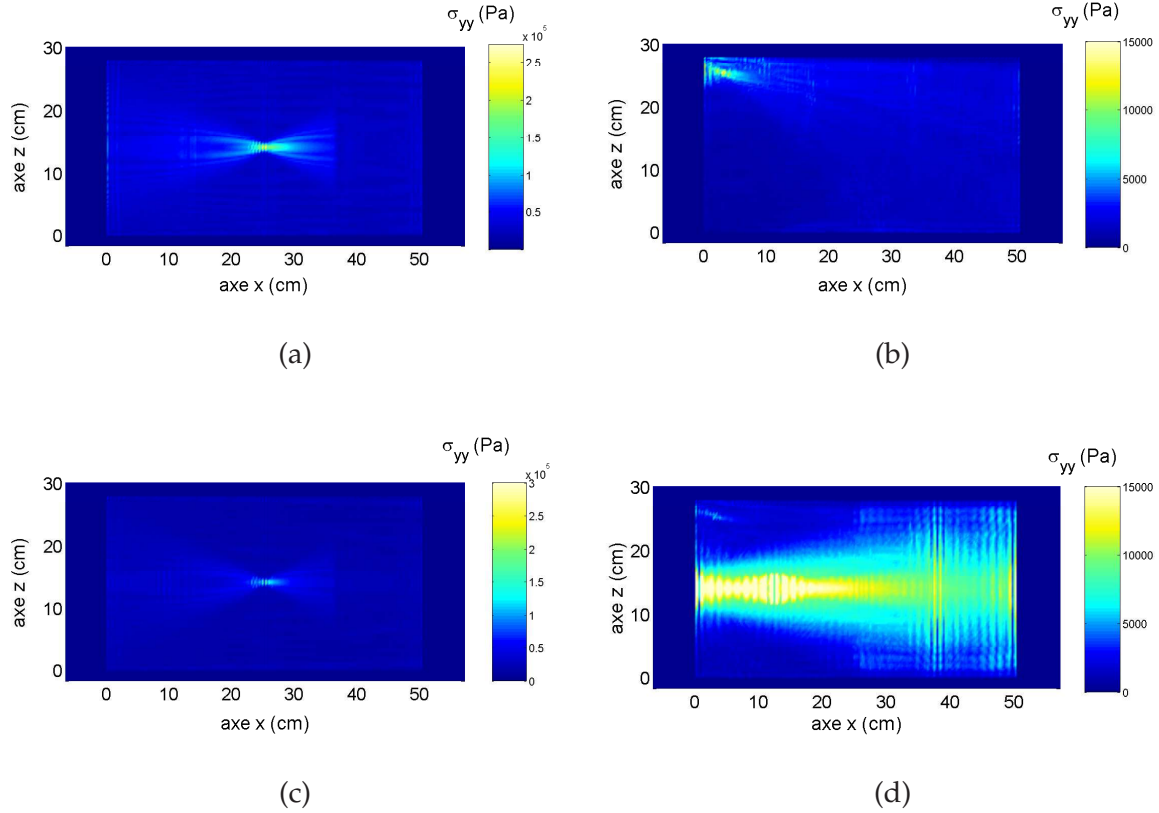


Figure 44 – Visualisation de la rétrofocalisation NEWS-TR par évaluation du maximum de contraintes  $\sigma_{yy}$  avec un filtrage par inversion d'impulsion (a-b) avec un filtrage passe-bas classique (c-d) pour deux positions de défauts différentes (position centrale (a-c)) et position excentrée en haut à droite (b-d)

Excitation	Matrice linéaire
$f_c = 200 \text{ kHz}$	$E = 70 \text{ GPa}$
$p_0 = 50 \text{ kPa}$	$\rho_0 = 2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\chi = 2/f_c$	$\nu = 0.33$
$s_\chi = 3/f_c$	$C_{11} = C_{33} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
$\chi_x = 0.15$	$C_{44} = \frac{E}{2(1+\nu)}$
$\chi_z = 0.75$	
$x_s = 125 \text{ mm}$	$C_{13} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
$z_s = 150 \text{ mm}$	

Tab 3 – Paramètres de simulations numériques du domaine de simulation et de son excitation

- la volonté de présenter des résultats avec des variables physiques réelles non normalisées permettant de s'assurer en permanence que les ordres de grandeur sont

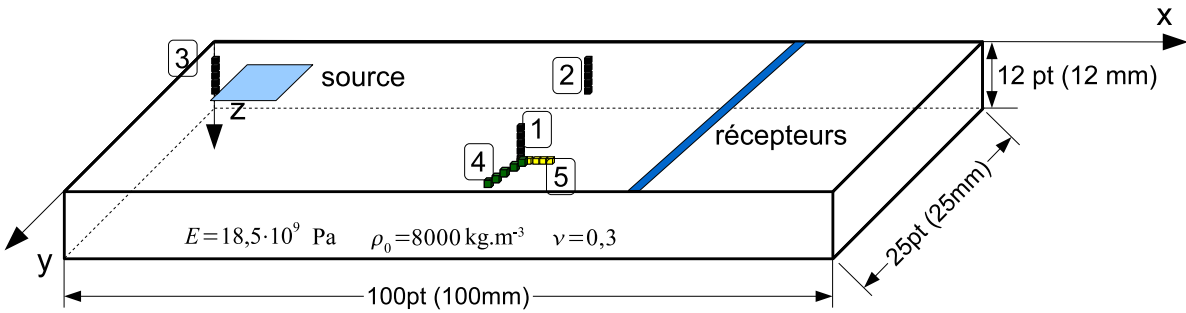


Figure 45 – Géométrie du domaine de simulation tri-dimensionnel avec les positions de la source, de la ligne de récepteurs et des différents défauts. Les caractéristiques du matériau sont :  $E = 18,5 \text{ GPa}$ ,  $\rho_0 = 8000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  et  $\nu=0,3$

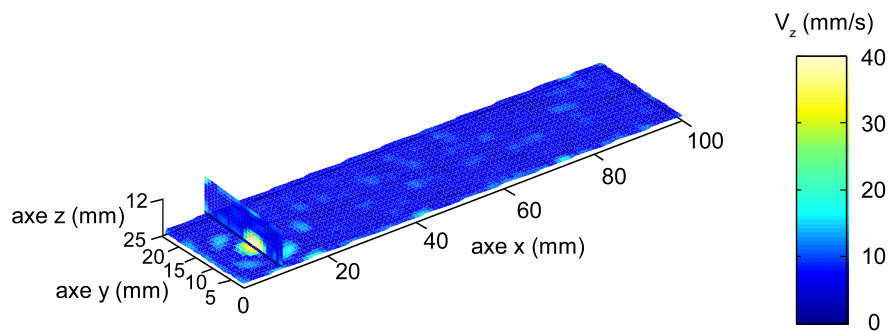


Figure 46 – Matrice des amplitudes maximales de la composante  $v_z$  obtenues durant la rétro-propagation du signal temporellement retourné

compatibles avec les hypothèses des phénomènes physiques observés.

- le réglage des paramètres des simulations (excitation, mesure, acquisition) proches des paramètres expérimentaux souvent imposés par les expériences
- l'utilisation de variables adaptées qui permet d'analyser le problème dans des espaces "propres" où les problèmes sont supposés découplés (formalisme de Kelvin 3D) ; méthodes proches de celles développées dans le cas des opérateurs fractionnés.

Cette démarche, compatible avec les contraintes et conséquences de la réponse des systèmes non linéaires se doit de prendre en compte l'ensemble du système considéré ; de l'excitation, du modèle et de la mesure.



## Chapitre 3

# Mise en place d'une analyse systémique

### 3.1 Introduction

L'analyse des systèmes complexes demande la mise en oeuvre d'approches spécifiques à la complexité *a priori* supposée. En effet, contrairement aux systèmes linéaires pouvant être complets, exhaustifs et difficiles à étudier, mais compréhensibles dans la mesure où il sont constitués de sous systèmes élémentaires, les systèmes complexes composés de plusieurs sous-systèmes différents, se caractérisent par la nécessité de les traiter dans leur ensemble. Entre ces entités extrêmes figurent les systèmes non linéaires qui, sous certaines conditions peuvent être étudié comme des systèmes linéaires mais qui, dans d'autres cas, présentent des propriétés relevant de la famille des systèmes complexes.

Les phénomènes étudiés lors de la propagation acoustique non linéaire présentent une certaine complexité expérimentale matérialisée par la difficulté de mise en oeuvre, la difficulté théorique de modélisation et la difficulté métrologique de l'exploration. La complexité de tout ces aspects se doit d'être traitée et pour chaque aspect, quelques solutions ont pu être proposées. Cependant chaque point doit être amélioré indépendamment et souvent de façon antagoniste. Ainsi l'amélioration des modèles demande des ressources diamétralement opposées aux besoins nécessaires en terme d'application technologique (Figure 47). C'est ainsi que l'objectif concret d'amélioration des images échographiques en terme de résolution nécessite de prendre en compte des phénomènes plus complexes, mettant en jeu des outils de modélisation et de traitement du signal de plus en plus élaborés afin de gagner, avec une instrumentation et une métrologie adaptée, en résolution d'imagerie ultrasonore.

La compréhension de la complexité d'un milieu non linéaire doit donc se faire en tenant compte de l'ensemble du système complet permettant d'explorer le milieu, partant de la procédure d'excitation de celui-ci, sa modélisation devant être multi-échelles et son analyse devant être également multi-échelles et multi-physique. Cette approche

systémique s'apparente alors à une complexification de l'analyse, mais permet de ne pas négliger certains effets, qui auparavant n'avaient aucune incidence, mais qui, dans le cas de systèmes non linéaires, peuvent induire, par couplage subtil, une contribution non négligeable.

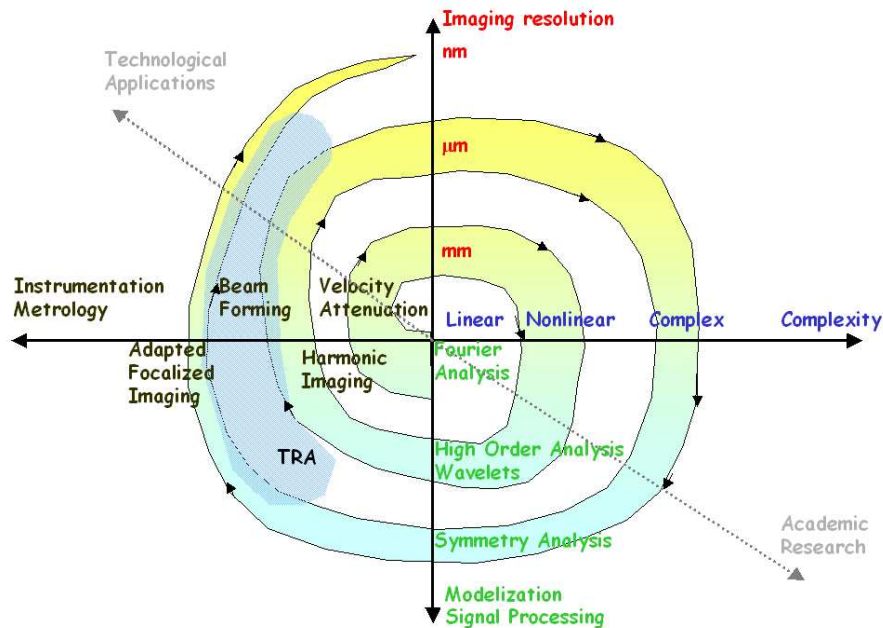


Figure 47 – Approche systémique de l'analyse des systèmes d'imagerie complexe[39]

## 3.2 Symétries des systèmes et groupes de Lie

Le concept de symétrie est très utilisé en physique car il permet de simplifier les problèmes afin d'en obtenir des représentations (par l'intermédiaire des équations associées au problème) plus facilement utilisables. Ces équations possèdent ainsi la signature de la symétrie *a priori* supposée. La théorie de groupes, très utilisée en physique fondamentale, nous enseigne également que si un système possède un certain nombre de symétries, alors des combinaisons de ces symétries peuvent donner lieu à un ensemble complet de propriétés générales régies rigoureusement par la théorie des groupes. C'est dans ce cadre que se situe la théorie de groupes développée par Sophus Lie, destinée à la simplification des équations différentielles, appliquée à la physique quantique et à la physique des particules au début du XX<sup>ème</sup> et remis à jour fin XX<sup>ème</sup> pour l'étude des symétries des équations différentielles[77, 25]. Elle a été stimulée par la présence de nouveaux logiciels de calcul formels, et d'ailleurs intégrée dans la nouvelle version de ceux-ci (Mathematica® 5). C'est cette méthode qui me semble désormais porteuse d'innovation pour aborder les problèmes les plus complexes explorés par les méthodes acoustiques non linéaires.

En effet, selon Nail Ibragimov and Oleg Rudenko [110] :

*"Another approach, namely, a complication of the model with the aim to find the desired solutions of a simpler problem, seems to be logically absurd. However, sometimes a complex model proves to be more simple to analyze. An example of such a "useful" complication in acoustics is the Burgers equation : The presence of the additional "viscous" term proportional to the higher (second-order) derivative on the right-hand side of this equation surprisingly does not complicate the initial first-order equation but, on the contrary, provides the possibility to solve the problem."*

et selon B. J. Cantwell [25] :

*"Symmetry Analysis based on Lie group theory is the most important method for solving nonlinear problems aside from numerical simulation."*

L'intérêt de l'étude des symétries d'une équation qui dépendent d'un paramètre continu réside dans leur structure de groupe continu et dans les outils théoriques en résultant qui garantissent la possibilité de réduire les équations différentielles. En quelques décennies, pas moins d'une dizaines d'ouvrages ont été répertoriés dans le domaine[12, 6, 74, 76, 96, 25]. En acoustique, on note l'utilisation des symétries de Lie pour l'étude de la turbulence[2, 104], ou pour la simplification des phénomènes de diffusion complexes[31].

La puissance des méthodes à base de la théorie des groupes réside dans le fait qu'elles ne sont pas basées sur les opérateurs linéaires, ni sur des principes de superposition ou tout autre aspect requis par les méthodes linéaires. Cela en fait donc des méthodes particulièrement adaptées aux modèles non linéaires. Le cœur de cette approche, quelques exemples d'application et la transposition en terme d'instrumentation et d'applications, est présentée dans cette partie.

### 3.2.1 Symétrie d'une équation différentielle

La représentation mathématique d'un système physique ( $\mathcal{S}$ ) est effectuée à partir d'une équation différentielle ( $\mathcal{E}$ ). La symétrie du système doit alors être contenue dans la symétrie de l'équation.

Considérons, pour débiter, l'équation du premier ordre

$$\mathcal{E}(u, u') = 0 \text{ avec } u' = f(u), \quad (\text{II.3.1})$$

où  $u = u(t)$ ,  $u' = \frac{du}{dt} = u_t$  et  $f(u)$  est explicitement indépendante du temps. Cette équation se traite par quadrature utilisant une séparation des variables. Toutes les solutions sont invariantes par les transformations

$$\bar{t} = t + a, \quad d\bar{t} = d(t + a) = dt, \quad \bar{u} = u, \quad (\text{II.3.2})$$



qui forment un groupe de Lie ; le groupe continue des translations temporelle le long du  $t$ -axe et de paramètre continu  $a \in \mathbb{R}$ . L'élément neutre du groupe est  $a = 0$  et l'élément inverse est une translation temporelle de paramètre  $-a$ . Ainsi l'équation (Eq.II.3.1) est invariante selon la transformation de groupe (Eq.II.3.2), ie

$$\mathcal{E}(\bar{u}, \bar{u}') = \mathcal{E}(u, u') = 0. \quad (\text{II.3.3})$$

Ainsi toute équation physique ( $\mathcal{E}$ ) possède de manière intrinsèque des symétries, c'est-à-dire des transformations de ses variables qui laissent sa forme inchangée. Par exemple, les équations linéaires  $\mathcal{E}(x) = 0$  possèdent toutes une symétrie du type  $F(x) = Cx$  en raison du principe de superposition. De même, l'étude des symétries de l'équation d'onde acoustique linéaire permet de confirmer la présence d'une classe de solutions du type  $u = f(x - c_0 t)$  et d'établir qu'elle possède une infinité d'invariants[139].

Considérons à présent l'équation de diffusion (équation de la chaleur) :

$$\mathcal{E}(t, x, T) = T_t - T_{xx} = 0. \quad (\text{II.3.4})$$

Si l'on effectue les transformations de variables  $\bar{x} = F(x, a)$  suivants :  $\bar{x} = e^a x$ ,  $\bar{t} = e^b t$  et  $\bar{T} = e^c T$ , alors

$$\mathcal{E}(\bar{t}, \bar{x}, \bar{T}) = H(a)\mathcal{E}(t, x, T) = 0, \quad (\text{II.3.5})$$

si  $a = b/2$ . On constate alors que la variable  $\alpha = \frac{\bar{x}}{\sqrt{\bar{t}}} = \frac{x}{\sqrt{t}}$  est un invariant de l'équation  $\mathcal{E}(t, x, T)$ . Il se trouve que cette variable  $\alpha(x, t) = \frac{x}{\sqrt{t}}$  est celle qui permet de transformer l'équation de diffusion (PDE) en une équation différentielle ordinaire (ODE) et d'en extraire les solutions en utilisant les logiciels de calculs formel comme Mathematica® (voir Annexe 3).

La généralisation des transformations des variables d'une équation  $\mathcal{E}(x)$  peut alors s'écrire

$$F(x, a) = e^{(a-a_0)\xi(x)}, \quad (\text{II.3.6})$$

et peut être appliquée en acoustique aux variables  $(x, y, z, t)$  mais aussi aux grandeurs physiques  $(T, p, \rho, \sigma, \epsilon, \text{etc.})$  et leurs dérivées  $(p_x, p_t, p_{xx}, \text{etc.})$ .

Pour une équation aux dérivées partielles ou une équation aux dérivées ordinaires d'ordre  $n > 1$ , il est possible de déterminer l'ensemble des générateurs infinitésimaux de symétries de l'équation de manière systématique, en résolvant l'équation de détermination de ( $\mathcal{E}$ )[25]. On note  $\xi_i$  (resp.  $\eta_i$ ) les générateurs infinitésimaux correspondant aux variables indépendantes (resp. dépendantes) de ( $\mathcal{E}$ ). Les équations caractéristiques, données par

$$dx_1/\xi_1 = \dots = dx_p/\xi_p = dy_1/\eta_1 = \dots = dy_q/\eta_q, \quad (\text{II.3.7})$$

où les  $x_i$  sont les variables indépendantes et  $y_i$  les variables dépendantes, permettent d'extraire  $n - 1$  invariants de l'équation ( $\mathcal{E}$ ) qui, exprimée entièrement en fonction de

ces nouvelles variables, est alors réduite d'un ordre (comme dans le cas de l'équation de diffusion traitée auparavant).

Une méthode originale de recherche de symétries et invariants a été développée par Moran[95] et consiste à effectuer un développement du premier ordre de l'équation II.3.6 pour rechercher les transformations de groupe du type :

$$\bar{S} = C^S(a)S + K^S(a), \quad (\text{II.3.8})$$

où  $S$  représente les variables dépendantes  $(x, y, z, t)$  ou indépendantes  $(T, p, \rho, \sigma, \epsilon, \text{etc.})$ . Ainsi, avec les transformations des dérivées  $\bar{S}_i = C^S/C^i S_i$ , et  $\bar{S}_{ij} = C^S/C^i C^j S_{ij}$ , toute équation acoustique non linéaire  $\mathcal{E}(S, S_i, S_{ij})$  est dite invariante si il existe des paramètres de groupe  $C^S(a), K^S(a)$  permettant d'écrire

$$\mathcal{E}(\bar{S}, \bar{S}_i, \bar{S}_{ij}) = H(a)\mathcal{E}(S, S_i, S_{ij}), \quad (\text{II.3.9})$$

avec  $H(a)$  qui ne dépend uniquement que du paramètre de groupe  $a$ .

### 3.2.2 Ensemble complet des invariants d'un groupe de symétrie

Une fois les paramètres de groupe  $C^S(a)$  et  $K^S(a)$  déterminés pour chaque variable dépendante et indépendante, un théorème fondamental de la théorie des groupes[95] permet d'extraire l'ensemble complet des invariants du groupe. En effet, pour une équation du type  $\mathcal{E}(r, z, u, u_i, u_{ij}) = 0$ , une fonction  $\eta(r, z, u, u_i, u_{ij})$  est un invariant du groupe de symétrie de cette équation si elle satisfait l'équation linéaire aux dérivées partielles

$$\sum_{i=1}^5 (\alpha_i S_i + \beta_i) \frac{\partial \eta}{\partial S_i} = 0, \quad (\text{II.3.10})$$

où  $S_i \equiv u, u_i, u_{ij}, r, z$  et  $\alpha_i = \frac{\partial C^{S_i}}{\partial a}(a_0)$  et  $\beta_i = \frac{\partial K^{S_i}}{\partial a}(a_0)$ ; soit, dans un cas particulier où l'on cherche  $\eta(r, z, u)$

$$(\alpha_r r + \beta_r) \frac{\partial \eta}{\partial r} + (\alpha_z z + \beta_z) \frac{\partial \eta}{\partial z} + (\alpha_u u + \beta_u) \frac{\partial \eta}{\partial u} = 0. \quad (\text{II.3.11})$$

Cet invariant permet d'effectuer, dans l'équation  $\mathcal{E}(r, z, u, u_i, u_{ij}) = 0$ , un changement de variable en introduisant l'invariant  $\eta(r, z, u)$  qui simplifie l'équation (réduction de l'ordre de l'équation ou du nombre de variables).

## 3.3 Symétries sur les conditions *a priori* d'analyse

La recherche des symétries d'une équation par la méthode développée par Lie demande un nombre important de calculs différentiels, ce qui explique la raison pour

laquelle cette méthode a été délaissée rapidement au début du XXème. Toutefois, cette méthode a connu une renaissance avec l'avènement des logiciels de calcul formel et c'est à la fin du XXème que la détermination automatique, complète et rigoureuse de la structure et des symétries des groupes de Lie a été proposé[102]. Un algorithme "simplifié" de recherche systématique des symétries a été implanté depuis 2002 en utilisant le logiciel de calcul formel Mathematica®5.1 pour traiter des cas simples[38], puis généralisé par les travaux de master de Camille Plag et Mathieu Domenjoud[52].

Nous avons appliqué l'analyse des symétries sur quelques équations de base afin de comprendre la méthode, puis sur les différentes équations acoustiques non linéaires présentées en partie 2.5.

### 3.3.1 Symétrie de l'équation des ondes sphériques

L'équation de propagation acoustique en hypothèse linéaire est donnée, pour un déplacement  $u(t, r, \theta, \phi)$  et, dans le système de coordonnées sphériques, par

$$\mathcal{E}(t, \theta, r, \phi, u) = \Delta u(t, r, \theta, \phi) - c_0^2 u_{tt}(t, r, \theta, \phi) = 0, \quad (\text{II.3.12})$$

où  $c_0$  est la célérité de l'onde et où  $\Delta = \frac{1}{r^2} \partial_r(r^2 \partial_r) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \partial_\theta(\sin \theta \partial_\theta) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \partial_\phi \partial_\phi$ , avec  $\partial_i = \frac{\partial}{\partial i}$ ,  $i = \{r, \theta, \phi\}$ . Si le problème possède une condition *a priori* de symétrie sphérique,  $u(t, r, \theta, \phi) = u(t, r)$  et (II.3.12) devient

$$2u_r(t, r)/r + u_{rr}(t, r)c_0^2 u_{tt}(t, r) = 0. \quad (\text{II.3.13})$$

Pour résoudre cette équation, il est communément admis<sup>1</sup> que le changement de variable de la forme

$$\Psi(t, r) = ru(t, r) \quad (\text{II.3.14})$$

transforme (II.3.13) en une équation d'onde plane  $\Psi_{tt}(t, r) - c_0^2 \Psi_{rr}(t, r) = 0$  et permet d'extraire la solution générale

$$u(t, r) = \frac{1}{r} \left[ f_1(r - ct) + f_2(r + ct) \right]. \quad (\text{II.3.15})$$

Le terme en  $1/r$  est ainsi la signature de la symétrie *a priori* sphérique du problème physique.

Dans le cas de l'équation d'ondes sphériques qui possèdent 2 variables indépendantes  $(t, r)$  et une variable dépendante  $(u)$ , les 3 générateurs infinitésimaux  $(\xi_1, \xi_2, \eta)$  ont été extraits grâce à l'algorithme de recherche systématique des symétries (Annexe 3) et sont donnés par

$$\xi_1(t, r, u) = C_1 + C_2 t; \quad \xi_2(t, r, u) = C_3 + C_2 r, \quad (\text{II.3.16})$$

$$\eta(t, r, u) = (C_4 - C_3/r) u + v(t, r), \quad (\text{II.3.17})$$

<sup>1</sup>L'origine physique de ce changement de variable est souvent habilement éludé !

où les  $C_i$  sont des constantes et  $v(t, r)$  est une solution de l'équation d'ondes sphérique. Le groupe de Lie associé à ces générateurs est donc un groupe à quatre paramètres, étendu sur les quatre opérateurs  $X_i$  suivants :

$$X_1 = \partial_t ; X_2 = r\partial_r + t\partial_t, X_4 = u(\partial_u), \quad (\text{II.3.18})$$

$$X_3 = \partial_r - u/r\partial_u. \quad (\text{II.3.19})$$

Les équations caractéristiques correspondants à l'opérateur  $X_3$  sont alors  $dt/0 = dr/1 = \frac{du}{-u/r}$ , conduisant à  $dr/r = -du/u$ . Un invariant qui couple la variable indépendante  $u$  et la variable dépendante  $r$  de (II.3.13) est donc donné par

$$\psi = ru(t, r), \quad (\text{II.3.20})$$

et l'on retrouve le changement de variable (II.3.14) permettant la résolution de l'équation d'ondes sphériques. Une origine physique de la pertinence de ce changement de variable est donc la conséquence des propriétés de symétries *a priori* supposées de l'équation (II.3.13).

### 3.3.2 Symétrie de l'équation de diffusion

L'algorithme de recherche des invariants a également été validé [47] pour l'équation de diffusion (Eq. II.3.4) dans le cadre du stage de master de Camille Plag. Comme précédemment, en appliquant l'algorithme à cette équation, les générateurs infinitésimaux s'expriment par (voir détail en Annexe 3) :

$$\tilde{\zeta}_1(t, x, T) = C_1 + C_2t + C_3t^2, \quad (\text{II.3.21})$$

$$\tilde{\zeta}_2(t, x, T) = C_2x/2 + C_3tx + C_4 + C_5t, \quad (\text{II.3.22})$$

$$\eta(t, x, T) = C_3(-tT/2 - x^2T/4) - C_5xT/2 + C_6T + g(t, x), \quad (\text{II.3.23})$$

où les  $C_i$  sont des constantes et  $g(t, x)$  est une solution de l'équation de la chaleur. Les opérateurs associés sont

$$X_1 = \partial_t ; X_2 = \partial_x, X_3 = T\partial_T ; X_5 = t\partial_x + xT/2\partial_T, \quad (\text{II.3.24})$$

$$X_6 = t^2\partial_t + tx\partial_x - \left(t - x^2/2\right)T/2\partial_T, \quad (\text{II.3.25})$$

$$X_4 = t\partial_t + x/2\partial_x. \quad (\text{II.3.26})$$

L'exploitation de l'opérateur  $X_4$  mène à l'équation caractéristique  $\frac{dt}{t} = \frac{dx}{x/2}$ , à laquelle correspond un invariant  $\zeta = \frac{x}{\sqrt{t}}$  qui donne l'équation  $v''(\zeta) + \zeta v'(\zeta) = 0$  dont la solution est

$$v(\zeta) = A \int_0^{\zeta/2} e^{-y^2} dy = A \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{t}}} e^{-y^2} dy = T(t, x). \quad (\text{II.3.27})$$

Une fois encore le changement de variable permet la réduction de la dimension de l'équation en la transformant en une équation différentielle ordinaire (ODE). Notons

que la signature linéaire des équations de propagation linéaire et de diffusion est présente respectivement dans les générateurs infinitésimaux (II.3.17) et (II.3.23) par l'intermédiaire des fonctions  $v(r, t)$  et  $g(t, x)$  qui rendent compte de la présence d'une infinité de solutions et de ce fait du principe de superposition linéaire. Néanmoins, cette "signature linéaire" n'intervient pas dans les opérateurs (Eqs. II.3.18-II.3.19) et (Eqs. II.3.24-II.3.26) leur conférant ainsi une richesse plus importante.

### 3.3.3 Symétries des équations de l'acoustique non linéaire

Les premiers travaux [5, 103, 58] traitant de l'analyse des symétries des équations de l'acoustique non linéaires ont été réalisés pour interpréter la transformation  $uv + 2\frac{\partial u}{\partial x} = 0$  de Hopf-Cole [75, 27] qui permet de transformer l'équation de Burgers [24]

$$\mathcal{E}(u, u_t, u_x, u_{xx}; x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad (\text{II.3.28})$$

en l'équation de diffusion

$$\mathcal{E}(v_t, u_x, u_{xx}; x, t) = \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0. \quad (\text{II.3.29})$$

L'équation de Burgers a été analysée par la théorie des groupes par Weiss [137] qui a déterminé son intégrabilité, ses transformations de Bäcklund et ses paires de Lax (voir partie 2.4). Les solutions exactes de Burgers ont été mathématiquement complètement recensées par Ibragimov [77] par cette méthode, et l'intérêt physique a été validé par la prise en compte des conditions initiales et des conditions aux limites [2] en utilisant la méthode développée par Moran [95]. Cette approche est très intéressante dans la mesure où elle relie les propriétés du groupe aux conditions d'excitation des systèmes à analyser. Enfin, Boyko [22] a généralisé cette étude sur les classes d'équations de type Burgers et en a déterminé la structure complète de groupe, en montrant que l'équation de diffusion appartient à la même famille des équations de type Burgers, avec les mêmes invariants, les mêmes familles de solutions.

### Symétries de l'équation KZ

Dans la partie 2.5.1, il a été présenté des changements de variables permettant de simplifier KZ. L'intérêt de trouver d'autres solutions a été évoqué très tôt, et l'objectif de trouver une légitimité physique à ces nouvelles variables a conduit à traiter KZ par les symétries. En 1997, Makov a obtenu d'autres solutions en appliquant successivement des transformations non linéaires utilisant la notion d'invariants [88].

L'analyse des symétries a été appliquée sur l'équation KZ (Eq. II.2.44)

$$\mathcal{E}(u, u_i, u_{ij}, r, \theta, z) = Nu_{\theta\theta}^2 - u_{\theta z} + u_{rr} + \frac{1}{r}u_r = 0, \quad (\text{II.3.30})$$

où  $i, j \in \{r, \theta, z\}$ , en appliquant la méthode de Moran[95] et Abd [2] qui intègre les conditions *a priori* d'excitation

$$u(r, \theta, z) = f(z)h(r, \theta, z), \quad (\text{II.3.31})$$

$$u(r, \theta, z) = g(\theta)k(r, \theta, z), \quad (\text{II.3.32})$$

permettant une pseudo-séparation des variables[38]. C'est ainsi que l'on a pu généraliser les conditions d'existence des solutions de la forme :

$$u(r, \theta, z) = \frac{1}{2NCz + D}h\left(\frac{r^2}{2NCz + D}, \theta\right), \quad (\text{II.3.33})$$

$$u(r, \theta, z) = \exp(K_1\theta)h(r, \theta, z), \quad (\text{II.3.34})$$

ou

$$u(r, \theta, z) = K_2\theta^2h(r, \theta, z). \quad (\text{II.3.35})$$

avec  $C, D, K_1, K_2$  des constantes dépendantes des conditions initiales et aux limites. Les solutions (II.3.33) et (II.3.34) correspondent bien aux solutions (II.2.45) et (II.2.47-II.2.52) avec un choix approprié des constantes  $C, D, K_1$  alors que la solution séculaire (II.3.35) ne reste qu'une solution mathématique avec une interprétation physique difficile.

## Symétries de l'équation hystérétique

Afin de rechercher les symétries de l'équation hystérétique donnée par le système (II.2.73-II.2.74), nous avons utilisé la propriété  $\left|\frac{\partial V}{\partial \theta}\right| = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial \theta}\right)^2}$  et transformé le système en une équation non linéaire plus complexe

$$\frac{\partial V}{\partial \xi} + \frac{V_M}{2} - \left(\frac{V_M}{2} - V\right) \left|\frac{\partial V}{\partial \theta}\right| = 0, \quad (\text{II.3.36})$$

ou encore

$$\mathcal{E}(V, V_i, V_M, \theta, \xi) \equiv \left(\frac{\partial V}{\partial \xi}\right)^2 + V_M \frac{\partial V}{\partial \xi} \frac{\partial V}{\partial \theta} + V(V_M - V) \left(\frac{\partial V}{\partial \theta}\right)^2 = 0, \quad (\text{II.3.37})$$

où  $V_i = \frac{\partial V}{\partial x_i}$ ,  $x_i \in \{\xi, \theta\}$ . Cette équation possède l'avantage de contenir les deux comportements de l'onde acoustique dans le milieu hystérétique : l'ouverture et la fermeture des cellules hystérétiques élémentaires ; mais elle possède l'inconvénient d'être plus complexe (termes non linéaires plus nombreux). La même méthode des symétries a été appliquée sur l'équation hystérétique (II.3.37) et les transformations associées

au groupe de paramètre  $a$  sont alors  $\bar{S} = C^s(a)S + K^s(a)$  où  $S$  désigne les variables  $\theta, \xi, V, V_M$ . Comme  $V_M(\xi)$  est défini comme étant le maximum de la solution  $V(\xi, \theta)$ , on peut supposer la forme *a priori*

$$V(\xi, \theta) = V_M(\xi)g(\xi, \theta). \quad (\text{II.3.38})$$

Dans ce cas, cette condition permet d'en déduire[43] que la solution s'écrit nécessairement

$$V(\xi, \theta) \equiv u_1(\xi, \theta) = V_M(\xi)g(\eta, \theta)K\theta, \quad (\text{II.3.39})$$

avec  $V_M(\xi) = 1/(\beta + \alpha\xi)^m$ ,  $\eta(\xi, V(\xi, \theta)) = (\beta + \alpha\xi)^{-\frac{\gamma}{\alpha}}V$  l'invariant implicite extrait par analyse des symétries et  $\alpha, \beta, \gamma, m$  des constantes dépendantes des conditions initiales et aux limites.

Dans le cas  $m = 1$ , qui correspond au cas traité par Vitalyi Gusev[108], on a pu montrer que la condition donnée par

$$V(\xi, \theta) \equiv u_1(\xi, \theta) = 1/(\beta + \alpha\xi)^m g(\xi, \theta)K\theta, \quad (\text{II.3.40})$$

vérifie l'équation (II.3.37) si

$$-K\alpha\theta + (\beta + \alpha\xi)u_1(K + \alpha((\beta + \alpha\xi)^{-\frac{\gamma}{\alpha}}u_1)^{\frac{\alpha}{\gamma}}) = 0, \quad (\text{II.3.41})$$

qui est une équation purement polynomiale dont le nombre de solutions dépend de l'exposant  $n = \frac{-\gamma}{\alpha}$ . Un certain nombre de solutions mathématiques ont pu être trouvées et vérifiées avec Mathematica® (voir annexe 1), comme la solution triviale, donnée pour  $n = 1$  :

$$u_1(\xi, \theta) = \frac{-\alpha + K\alpha\theta}{K(\beta + \alpha\xi)} = \frac{\alpha\theta - \alpha/K}{\alpha\xi + \beta}, \quad (\text{II.3.42})$$

avec  $K, \alpha, \beta$  des constantes arbitraires, et qui est compatible avec les solutions proposées dans [108].

Il est remarquable de noter que la solution proposée  $u_1(\xi, \theta)$  ne vérifie pas le principe de superposition car  $2u_1(\xi, \theta)$  n'est pas solution de l'équation. Une application très concrète de cette propriété pourrait être dans le domaine de la calibration et la métrologie des amplitudes d'excitation (appliquées ou mesurées). Les autres solutions présentent également un intérêt en termes d'applications, comme l'existence de solutions de type impulsionnelle ou soliton (Figure 48) dans le cas  $n = -1/2$  ou N-wave dans le cas  $n = 3$ , suscitant actuellement un réel intérêt en raison des propriétés attractives de ces ondes[117, 55, 111] et du formalisme théorique sous-jacent permettant de les étudier[114].

L'étude préliminaire de la symétrie des équations de l'acoustique non linéaire a permis de mettre en exergue la puissance et la potentialité de cette méthode en terme de simplification d'un modèle par sa "complexification *a priori*". C'est ce paradoxe très surprenant évoqué dans [110] qui consiste à complexifier un système (et son excitation) pour en réduire le nombre de symétries et invariants ; les systèmes linéaires étant paradoxalement les systèmes possédant le plus de symétries et de solutions, du fait du principe de superposition.



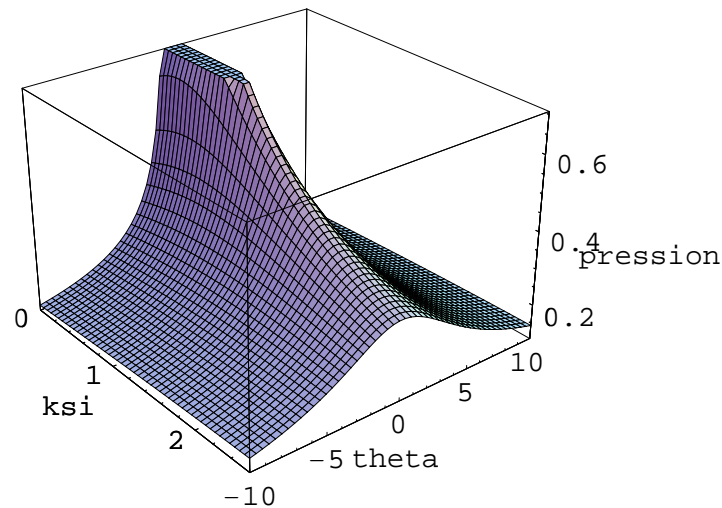


Figure 48 – Évolution temporelle (suivant  $\theta$ ) et spatiale (suivant  $\xi$ ) de la pression donnée par la dérivée de la solution (Eq. 1 de l'Annexe 1) avec  $n = -1/2$ ,  $\xi = x/x_{NL}$  et  $\theta$  exprimé en fonction de  $V = v/v_0$  et  $K = 4$ ;  $\beta = 1/2$ . L'excitation initiale s'élargie au cours de la propagation conformément aux résultats connus dans les milieux hystérétiques

### 3.4 Symétries sur les conditions *a priori* d'excitation

De part les méthodes utilisées pour simplifier les équations de l'acoustique non linéaire, il se trouve que la connaissance *a priori* des caractéristiques de l'excitation peuvent simplifier le problème physique : c'est le cas de la simplification de l'équation d'Aanonsen en équation KZK, par exemple. Ce travail sur la symétrisation de l'excitation s'est fait dans le cadre du projet SYANTRA (Symmetry Analysis for Time Reversal Acoustics, voir partie 1) pour lequel l'objectif était de prendre en compte les propriétés de symétries pour améliorer la caractérisation non linéaire de milieux complexes.

C'est au cours de ce projet qu'on a testé expérimentalement les propriétés d'invariance suivante :

- symétrisation par réciprocité par l'utilisation de la méthode TR-NEWS
- symétrisation par retournement temporel
- symétrisation par inversion d'impulsion
- symétrisation par position de sources d'émission ultrasonores
- symétrisation par corrélation d'excitation (sweep-TR-NEWS)

C'est l'invariance par retournement temporel et par inversion d'impulsion qui ont été principalement mises en œuvre pour extraire la signature non linéaire d'ordre 2 et qui ont conduit aux méthodes TR-NEWS et NEWS-TR.

### 3.4.1 Symétries de la méthode d'inversion d'impulsion

Soit un système non linéaire ( $\mathcal{S}$ ) et dont la réponse  $y(t)$  à l'excitation  $x(t)$  est donnée par :

$$y(t) = NL[x(t)] = N_1 x(t) + N_2 x^2(t), \quad (\text{II.3.43})$$

où  $N_1$  et  $N_2$  sont respectivement les coefficients linéaires et du second ordre. Si on applique les deux excitations  $X_E = x(t)$  et  $X_I = -x(t)$ , on peut extraire  $N_1$  et  $N_2$  à l'aide des réponses non linéaires  $Y_E(t)$  et  $Y_I(t)$  avec :

$$N_1 = \frac{Y_E(t) - Y_I(t)}{2x(t)}, \quad (\text{II.3.44})$$

$$N_2 = \frac{Y_E(t) + Y_I(t)}{2x^2(t)}. \quad (\text{II.3.45})$$

La méthode d'inversion d'impulsion (Figure 49), utilisée en instrumentation Doppler classique, consiste à utiliser l'équation II.3.45 afin d'extraire la signature de la nonlinéarité  $N_2$ .

En terme de groupes de symétries, les excitations  $X_E$  and  $X_I$  peuvent être associées à l'élément neutre  $E$  et à l'inversion  $I$  du groupe ponctuel  $C_2$  (Table 4). Les quantités  $\Phi_{A_g} = Y_E(t) + Y_I(t)$  et  $\Phi_{A_u} = Y_E(t) - Y_I(t)$  peuvent être interprétées comme les fonctions propres du système parce que  $\Phi_{A_g} = 2N_2 x^2(t)$  et  $\Phi_{A_u} = 2N_1 x(t)$  permettent de complètement séparer la partie linéaire et non linéaire de la réponse. Les propriétés de ( $\mathcal{S}$ ) par rapport au groupe  $C_2$  permet la séparation des réponses.

$C_2$	$E$	$I$	$C_2$	$E$	$I$
$E$	$E$	$I$	$A_g$	1	1
$I$	$I$	$E$	$A_u$	1	-1

Tab 4 – Table de multiplication (à gauche) et table de caractères (à droite) du groupe ponctuel  $C_2$ . La colonne du haut indique les éléments du groupe, et la première colonne les représentations irréductibles paire  $A_g$  et impaire  $A_u$ .  $E$  est l'identité,  $I$  est l'inversion ou une rotation d'angle  $\pi$

### 3.4.2 Généralisation de la symétrisation de l'excitation

La généralisation ESAM (Excitation Symmetry Analysis Method)[52] de l'approche précédente peut être faite sur un système ( $\mathcal{S}$ ) d'ordre 3 donné par :

$$y(t) = NL[x(t)] = N_1 x(t) + N_2 x^2(t) + N_3 x^3(t), \quad (\text{II.3.46})$$

où  $N_3$  est le coefficient d'ordre 3, avec le groupe  $C_3$  des rotations d'ordre 3 dont les propriétés sont données par le tableau 5. Si on construit de nouvelles excitations  $X_g$

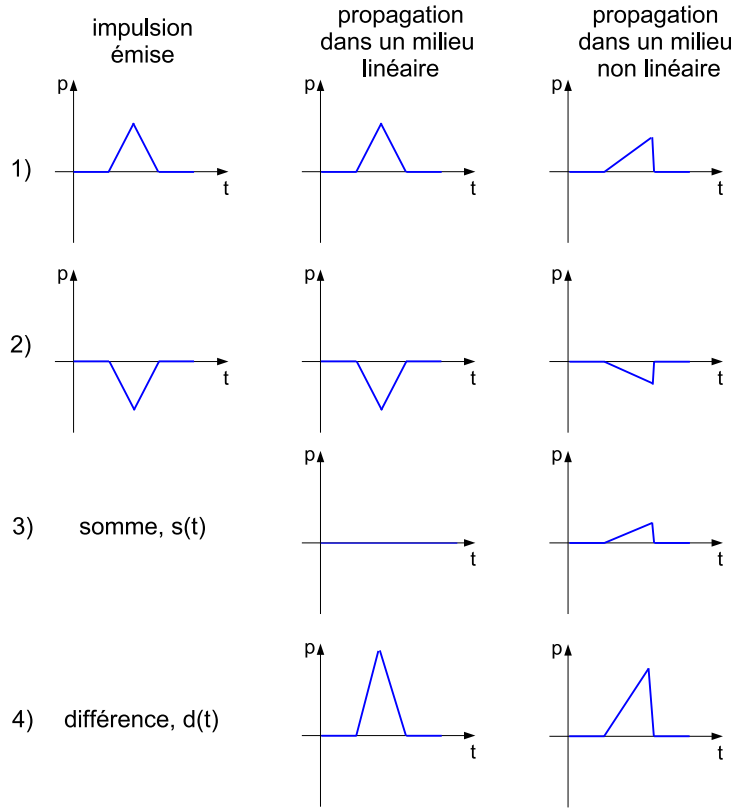


Figure 49 – Principe de filtrage par inversion d'impulsions ultrasonores : (1) une impulsion est transmise, les propagations dans un milieu linéaire et dans un milieu non linéaire sont représentées ; (2) l'opposée de la première impulsion est transmise par le même transducteur, les propagations dans les mêmes milieux linéaire et non linéaire que précédemment sont représentées ; (3) les signaux reçus sont additionnés ; (4) les signaux reçus sont soustraits. La somme  $s(t)$  est non nulle uniquement dans le cas d'une propagation dans un milieu non linéaire

associées à l'élément  $g$  du groupe  $C_3$

$$X_E = U_E(x(t)) = x(t), \quad (\text{II.3.47})$$

$$X_\epsilon = U_\epsilon(x(t)) = x(t)e^{\frac{2i\pi}{3}}, \quad (\text{II.3.48})$$

$$X_{\epsilon^*} = U_{\epsilon^*}(x(t)) = x(t)e^{-\frac{2i\pi}{3}}, \quad (\text{II.3.49})$$

on peut alors montrer que les "fonctions propres"  $\Phi_m$ , issues des fonctions de base des représentations irréductibles  $m$ , définies par

$$\Phi_m = \sum_{g \in C_3} \chi_m(g) Y_g, \quad (\text{II.3.50})$$

où  $\chi_m(g)$  est le caractère associé à l'élément  $g$  de la représentation irréductible  $m$  (Table 5), et  $Y_g = NL[X_g]$  est la réponse non linéaire de  $\mathcal{S}$  à l'excitation propre  $X_g$  définie par (II.3.47-II.3.49), permettent de simplifier le problème. En effet, on obtient

$$\Phi_{A_1} = 3N_3 x^3, \quad (\text{II.3.51})$$

$C_3$	$E$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$C_3$	$E$	$\epsilon$	$\epsilon^*$
$E$	$E$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$A_1$	1	1	1
$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon^*$	$E$	$A_2$	1	1	-1
$\epsilon^*$	$\epsilon^*$	$E$	$\epsilon$	$E_1$	2	-1	0

Tab 5 – Table de multiplication (à gauche) et table de caractères (à droite) du groupe ponctuel  $C_3$ . La colonne du haut indique les éléments du groupe avec  $\epsilon = e^{\frac{2i\pi}{3}}$  la rotation d'angle  $\frac{2\pi}{3}$ ,  $\epsilon^* = e^{-\frac{2i\pi}{3}}$  celle d'angle  $-\frac{2\pi}{3}$ , et la première colonne les représentations irréductibles ( $A_1, A_2, E_1$ )

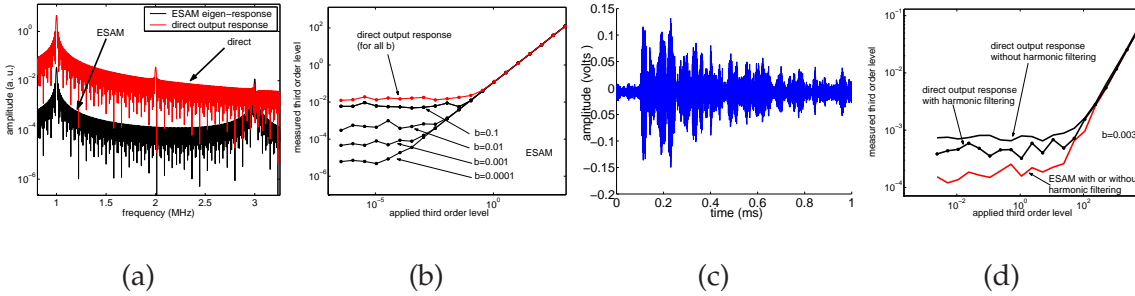


Figure 50 – Comparaison entre l'extraction classique de la nonlinéarité par analyse de la réponse directe, et l'analyse ESAM : (a) spectre ; (b) en fonction du niveau  $N_3$  et du niveau de bruit ; (c-d) pour une coda utilisée dans TR-NEWS

$$\Phi_{A_2} = N_3 x^3 - 2\epsilon [N_2 x^2 + \epsilon N_1 x], \quad (\text{II.3.52})$$

$$\Phi_E = N_3 x^3 + (2 - \epsilon^*) N_2 x^2 + (2 - \epsilon) N_1 x. \quad (\text{II.3.53})$$

En utilisant la "fonction propre"  $\Phi_{A_1}$  donnée par (II.3.51) et associée à la représentation complètement symétrique  $A_1$ , elle permet l'extraction de la composante non linéaire  $N_3$  sans perturbation des termes  $N_1$  et  $N_2$ , qui pourront être extraits avec la méthode d'inversion d'impulsion classique. Dans ce cas, la symétrisation de l'excitation découple partiellement les équations non linéaires et permet d'accéder aux paramètres expérimentaux  $N_1$ ,  $N_2$  et  $N_3$ .

L'analyse des performances d'ESAM a été réalisée à partir de simulations numériques. Il s'agissait de comparer la sensibilité de détection de l'harmonique 3 réalisée avec ESAM avec celle réalisée de façon classique avec la FFT numérique. Le signal d'excitation initial est un train d'onde classique  $x(t) = \Pi_\tau(t) \cos(2\pi f_0 t) + \gamma(t)$ , où  $\Pi_\tau(t)$  est une fonction porte de durée  $\tau = 90\mu\text{s}$ ,  $\gamma(t)$  un bruit blanc dans la gamme  $[-b; b]$  et  $f_0 = 1\text{MHz}$  est la fréquence. L'étude consiste à comparer l'amplitude de la FFT de la réponse directe  $y(t)$  et celle de l'amplitude de la réponse ESAM  $\Phi_{A_1}$  donnée par l'équation II.3.50. L'amplitude de la FFT de la réponse non linéaire  $y(t)$  présente les raies classiques à 2 et 3 MHz (Figure 50a). Pour les valeurs  $N_1 = 10$ ,  $N_2 = 0.158$  et  $N_3 = 0.0348$ , l'harmonique 3 semble difficile à détecter avec la réponse directe  $y(t)$  alors qu'il ressort du bruit avec la réponse ESAM  $\Phi_{A_1}$ , même si il subsiste encore des effets de troncature liés à l'utilisation de la FFT. Si l'on diminue la valeur de  $N_3$ , en lais-

sant  $N_1$  and  $N_2$  constants, la comparaison du niveau détecté par la réponse directe  $y(t)$  et la réponse ESAM  $\Phi_{A_1}$  est présentée en figure 50b et montre la différence d'efficacité entre les deux méthodes pour différentes valeurs du bruit  $b$ .

Les coda des méthodes TR-NEWS et NEWS-TR ont également été testées comme signaux d'excitation. L'objectif étant d'associer ESAM pour améliorer les méthodes d'inversion d'impulsion utilisées pour évaluer les nonlinéarités. En pratique, le signal initial  $x_e(t)$  (Figure 50c) provenant de la propagation d'une onde dans un matériau est inversée temporellement et est utilisée comme nouvelle excitation  $x(t) = x_e(-t)$ . L'extraction de la nonlinéarité a donc été effectuée sur la réponse  $y(t) = NL[(x(t))]$  directe avec et sans filtrage initial de l'excitation  $x_e(t)$  qui possédait déjà des nonlinéarités intrinsèques, et avec la méthode ESAM pour différentes valeurs de la nonlinéarité  $N_3$  (Figure 50d).

### 3.4.3 Symétrie par renversement temporel

Pour décrire algébriquement l'invariance par retournement temporel, on peut considérer un système constitué de  $N$  particules évoluant dans un domaine  $\mathcal{D}$ . Pour un système supposé conservatif, les équations du mouvement se déduisent des équations de Lagrange

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} \vec{q}_i + \vec{\nabla} U(\vec{q}_1, \vec{q}_2, \dots, \vec{q}_N) = \vec{0}, \quad (\text{II.3.54})$$

qui traduisent la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie totale ;  $U(\vec{q}_1, \vec{q}_2, \dots, \vec{q}_N)$  étant le potentiel.

De façon générale, les équations de Lagrange s'écrivent :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \mathcal{L} - \frac{\partial}{\partial q_i} \mathcal{L} = \left[ \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial}{\partial q_i} \right] \mathcal{L} = \mathcal{O}_{\mathcal{L}}(t, q_i, \dot{q}_i) \mathcal{L} = 0, \quad (\text{II.3.55})$$

où  $\dot{q}_i = \frac{dq_i}{dt}$ , et  $\mathcal{L} = \frac{1}{2} m \dot{q}_i^2 - U(q_i)$ . Définissons l'opérateur  $T_-$  qui consiste à inverser le temps, utilisé en mécanique quantique dans l'approche CPT, par

$$T_-[f(t)] = f(-t) \text{ avec } T_- = T_-^{-1} \text{ et } T_- T_- = \mathbb{1}. \quad (\text{II.3.56})$$

Compte tenu des propriétés ci-dessus, le groupe à deux éléments  $T_-$  et  $T_-^{-1}$  est isomorphe au groupe de l'inversion  $C_2$  qui intervient également dans le processus d'inversion d'impulsion (partie 3.4.1).

Si on applique l'opérateur  $T_-$  au système représenté par les équations de Lagrange en formulation algébrique (Eq. II.3.55), on constate que

$$T_{-}\mathcal{O}_{\mathcal{L}}(t, q_i, \dot{q}_i)\mathcal{L} = \left[ \frac{d}{-dt} \frac{\partial}{-\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial}{\partial q_i} \right] T_{-}\mathcal{L}, \quad (\text{II.3.57})$$

soit

$$\left[ \frac{d}{-dt} \frac{\partial}{-\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial}{\partial q_i} \right] T_{-}\mathcal{L} = \left[ \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i(-t)} - \frac{\partial}{\partial q_i(-t)} \right] \mathcal{L}(q_i(-t), \dot{q}_i(-t)), \quad (\text{II.3.58})$$

indiquant que si  $q_i(t)$  est solution, alors  $q_i(-t)$  l'est aussi. On vérifie ainsi que d'un point de vue général, les équations de Lagrange avec un champs de forces dérivant d'un potentiel sont invariantes par retournement temporel. La formulation intégrale de l'équation de propagation (appelée aussi Théorème de Helmholtz-Kirchhoff) décrit le champ  $\Phi(\vec{r}, t)$  par

$$\Phi(\vec{r}, t) = \oint_S \left[ G(\vec{r}_s, \vec{r}, t) \otimes_t \frac{\partial \Phi(\vec{r}_s, t)}{\partial n_s} - \frac{\partial G(\vec{r}_s, \vec{r}, t)}{\partial n_s} \otimes_t \Phi(\vec{r}_s, t) \right] dS, \quad (\text{II.3.59})$$

où  $G(\vec{r}_s, \vec{r}, t)$  est la fonction de Green du milieu de propagation, solution de l'équation de propagation avec un terme source ponctuel en espace et en temps  $\delta(t)\delta(\vec{r}_s - \vec{r})$ . L'invariance par retournement temporel linéaire a permis d'estimer la précision des simulations numériques NEWS-TR.

### 3.4.4 Symétrie par réciprocité

La validation numérique de la méthode TR-NEWS exploitant l'invariance par réciprocité a également été étudiée et validée (Figure 51). La figure 52 montre que, quelle

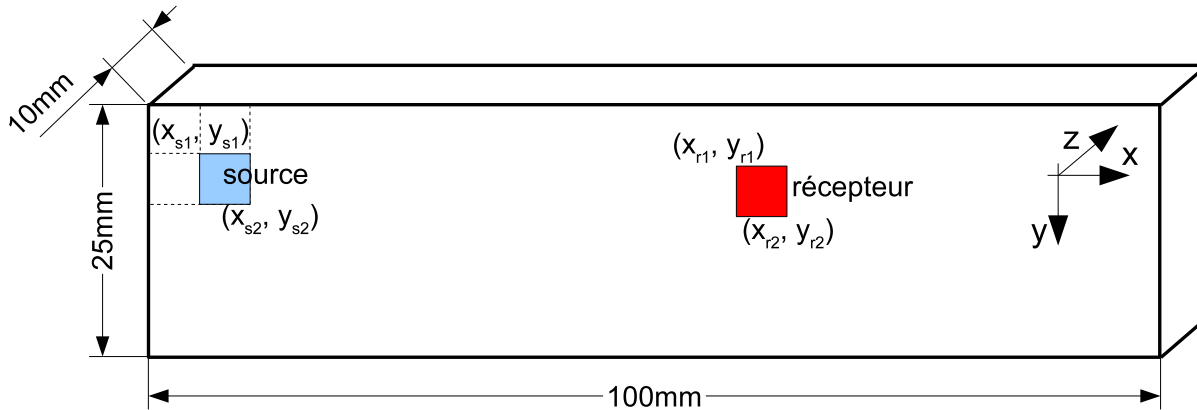


Figure 51 – Zone de simulation pour la vérification de la réciprocité de TR-NEWS.

que soit la position de la source et du récepteur dans le domaine de simulation, la réciprocité de TR-NEWS est vérifiée numériquement.

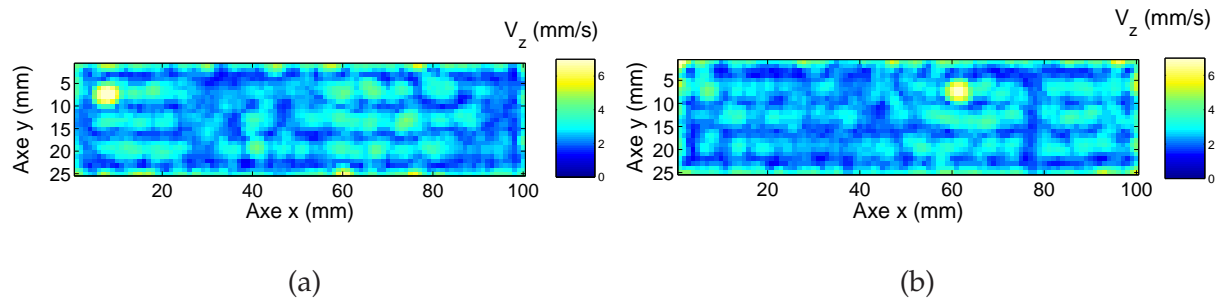


Figure 52 – Vérification de la réciprocité de TR-NEWS : représentation des matrices des amplitudes maximales enregistrées (a) pendant la rétrofocalisation de l'onde temporellement retournée envoyée par le récepteur vers la source et (b) pendant la rétrofocalisation de l'onde temporellement retournée envoyée par la source vers le récepteur

### 3.5 Systémique en acoustique non linéaire ultrasonore

De façon à prendre en compte l'aspect non stationnaire de la fatigue des matériaux, l'utilisation de modèles hystérétiques, dans lesquels les phénomènes de mémoire peuvent être intégrés à toutes les échelles, s'est donc imposée.

#### 3.5.1 Modélisation multi-échelles des milieux complexes

La prise en compte des effets non linéaires dans les milieux complexes demande nécessairement une modélisation multi-échelles. C'est dans le domaine des milieux granulaires et des roches[33] que l'on a exploité l'approche multi-échelles. Il a été montré qu'une fissure dans un matériau pouvait être considérée comme l'inclusion d'une partie "molle" dans une matrice dure et produisait une réponse non linéaire importante à toute sollicitation [94]. Ce type de nonlinéarité caractérisée par l'existence d'une boucle d'hystérésis dans la relation contrainte-déformation rend insuffisante l'utilisation de la théorie classique et nécessite le développement de nouvelles approches pour traiter les phénomènes non linéaires hystérétiques [109, 68] et [130, 129, 133] qui définissent un comportement non linéaire non classique.

C'est à partir de 2003, qu'a été développé, pour la première fois au LUSI[37] et dans le cadre de la Thèse de Thomas Goursole, l'étude multi-échelles de la physique des fissures d'un matériau par l'utilisation des espaces de Preisach-Mayergoys (appelés espaces PM)[97, 91, 113], étendu aux matériaux par Koen Van den Abeele *et al* [130, 129, 133]. Dans cette modélisation, que l'on décrira dans un modèle 1D, la variation temporelle de la contrainte  $\sigma$  est donnée par

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = K(\sigma, \sigma_{his}) \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (\text{II.3.60})$$



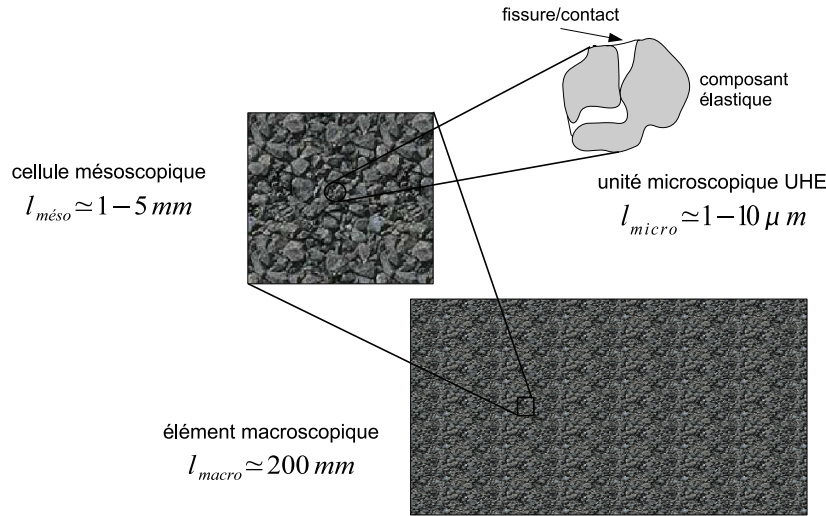


Figure 53 – Modélisation multi-échelles avec les longueurs caractéristiques présentes aux échelles macroscopique, mesoscopique et micro voire nanoscopique

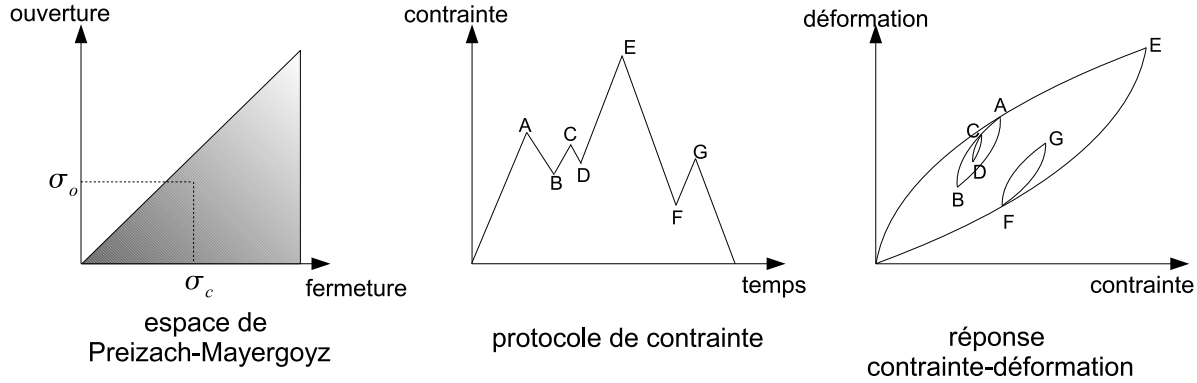


Figure 54 – Déformation relative à un protocole de contrainte décrit dans un espace de Preisach-Mayergoyz permettant la prise en compte des comportements multi-échelles (présence de nombreux hystérésis) et de l'effet mémoire

où  $v = \partial u / \partial t$  la vitesse particulière et  $x$  la coordonnée spatiale en 1D, et  $K(\sigma, \sigma_{his})$  donné par

$$\frac{1}{K(\sigma, \sigma_{his})} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} = \frac{\partial \epsilon_C}{\partial \sigma} + \frac{\partial \epsilon_H}{\partial \sigma} = \frac{1}{K_0(1 + \beta\sigma + \delta\sigma^2 + \dots)} + \frac{\partial \epsilon_H}{\partial \sigma}, \quad (\text{II.3.61})$$

avec

$$\frac{\partial \epsilon_H}{\partial \sigma} = - \int_{-\infty}^{P_f} dP_o \int_{P_o}^{+\infty} dP_f \rho_{PM}(P_f, P_o) \frac{\partial \epsilon_M}{\partial p} = - \frac{\partial \epsilon_H}{\partial p}, \quad (\text{II.3.62})$$

et  $\epsilon_M$  le déplacement associé à une unité hystérétique élémentaire (UHE) de l'espace PM, et  $\epsilon_C$  le déplacement associé à la nonlinéarité classique représentée par les coefficients non linéaire  $\beta$  et  $\delta$  du second et du troisième ordre.

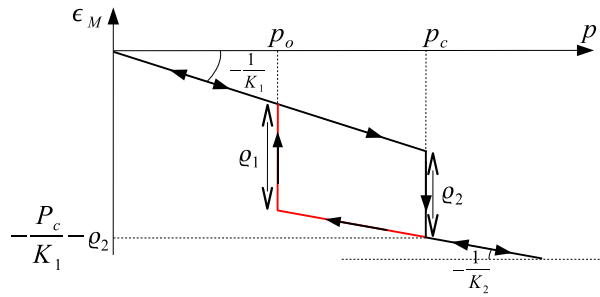


Figure 55 – Comportement hystérétique d'une UHE avec deux états élastiques. Un état correspond à l'état fermé (module élastique  $K_1$ ) et l'autre à l'état ouvert (module élastique  $K_2$ ) avec pour chacun une pression caractéristique associée  $P_o$  et  $P_f$ .

Dans le cas où les pressions d'ouverture et de fermeture des UHE sont définies par la figure 55, on peut montrer[60] que l'on a, pour  $\frac{\partial p}{\partial t} > 0$ ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon_H}{\partial p} = & - \int_{O_2}^p dP_o q_2 \rho_{PM}(P_o, p) - \frac{1}{K_2} \int_{-\infty}^{P_f} dP_o \int_{P_o}^{+\infty} dP_f \rho_{PM}(P_f, P_o) \\ & - \left( \frac{1}{K_1} - \frac{1}{K_2} \right) \int_{O_2}^{P_f} dP_o \int_p^{+\infty} dP_f \rho_{PM}(P_f, P_o), \end{aligned} \quad (\text{II.3.63})$$

où  $O_2$  est la coordonnée "ouverte" du point  $A_2$  dans l'espace PM, et si  $\frac{\partial p}{\partial t} < 0$ ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon_H}{\partial p} = & - \int_p^{C_2} dP_f q_1 \rho_{PM}(p, P_f) - \frac{1}{K_1} \int_{-\infty}^{P_f} dP_o \int_{P_o}^{+\infty} dP_f \rho_{PM}(P_f, P_o) \\ & - \left( \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \right) \int_{-\infty}^{P_f} dP_o \int_{P_o}^{C_2} dP_f \rho_{PM}(P_f, P_o), \end{aligned} \quad (\text{II.3.64})$$

où  $C_2$  est la coordonnée "fermée" dans l'espace PM. La contribution totale  $\frac{\partial \epsilon_H}{\partial \sigma}$  est donc complètement dépendante de l'excitation. Pour illustrer ce protocole, considérons une excitation du type de la figure 56. L'évolution dans l'espace PM est donnée par la figure 57, et la relation-contrainte déformation sera caractérisée par la présence d'une structure multi-échelles à hystérésis (Figure 54). Pendant la première phase du protocole de pression, c'est-à-dire du point 0 au point A, les UHE situées dans le triangle hachuré double incliné sont fermées. Une diminution de la pression (A à B) a pour conséquence d'ouvrir les UHE situées dans le triangle hachuré droit. Lorsque la pression augmente de nouveau jusqu'au point C, les UHE situées dans le triangle hachuré double incliné se ferment et ainsi de suite. Avec un tel concept de modélisation multi-échelles, un échantillon macroscopique est constitué d'un nombre fini de cellules mesoscopiques (figure 53). Chaque cellule est constituée d'un nombre important d'unités microscopiques qui peuvent être assimilées à des grains individuels, à des contacts entre grains,

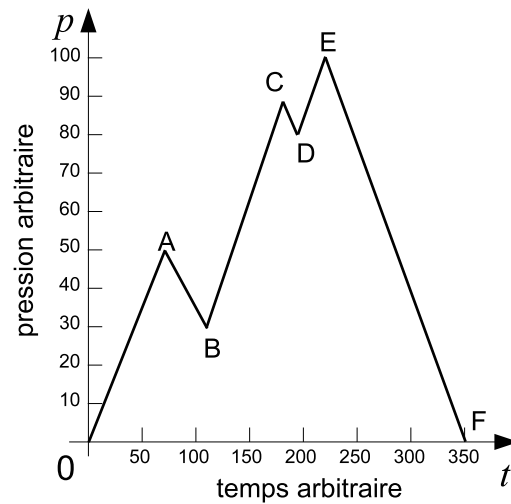


Figure 56 – Protocole de pression appliqué à un matériau dont les caractéristiques hystérétiques sont modélisées sur l'espace de Preisach-Mayergoysz présenté sur la figure 57. À l'état initial 0, toutes les UHE sont ouvertes.

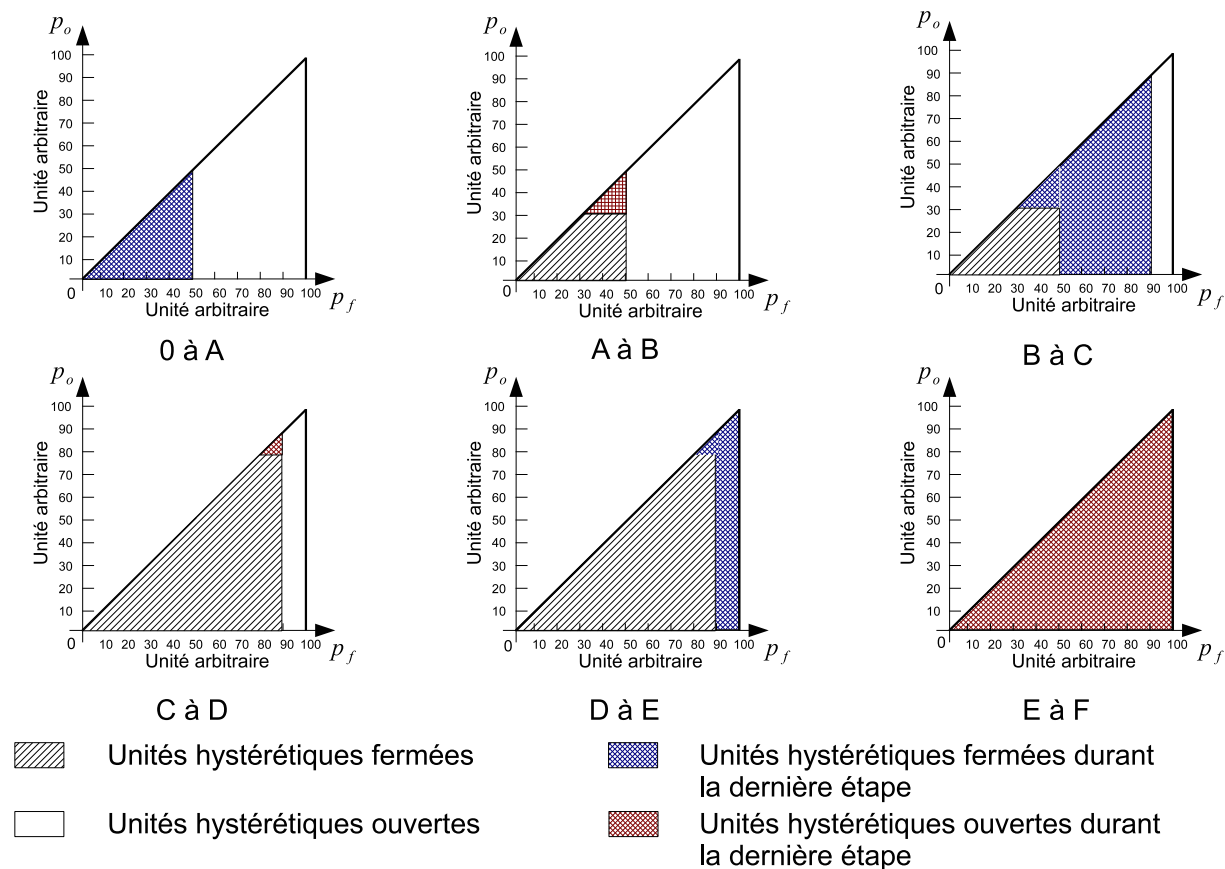


Figure 57 – Évolution de l'espace de Preisach-Mayergoysz associé à un matériau au comportement hystérétique suivant le protocole de pression présenté sur la figure 56.

à des zones d'interface ou encore à des micro-fissures. La longueur d'onde caractéristique des expériences réalisées est  $\lambda = c/f = 5\text{mm}$ . Il est donc possible d'accéder aux cellules mesoscopiques : la modélisation multi-échelles de ce type de comportement est alors adaptée à la simulation des expériences réalisées.

### 3.5.2 Traitement du signal multi-échelles

Le fait d'introduire l'aspect temporel dans l'analyse de la signature spectrale d'un signal ultrasonore s'applique également à l'effet Doppler qui se caractérise par une variation de la caractéristique fréquentielle d'un système. Cette approche multi-échelles temps-fréquence du traitement du signal a été appliquée dans le cadre du projet CO-POL (partie 2.2) dont l'objectif était de caractériser la rugosité de surface par conversion du spectre spatial en spectre Doppler. C'est par une approche temps-fréquence que l'on permet le couplage entre les variables spatiales (distribution de rugosité) et temporelles (spectre Doppler)[45, 46].

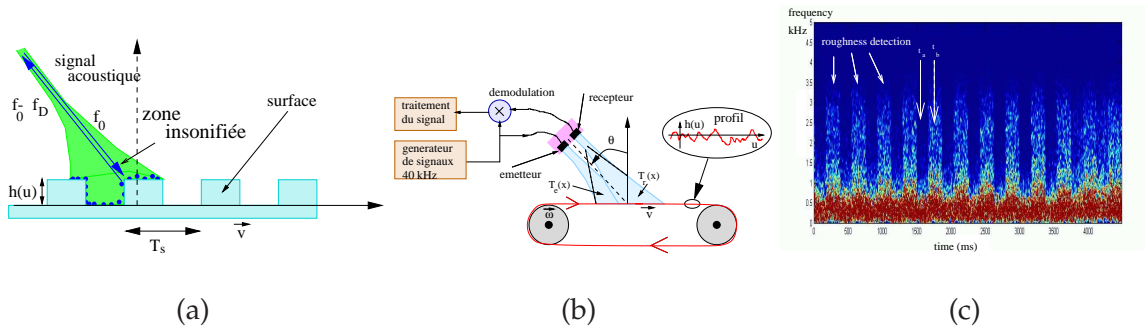


Figure 58 – Dispositif expérimental de caractérisation de rugosité de surface en déplacement (vitesse  $\vec{v}$ ) et spectrogramme (c) temps-fréquence du signal rétrodiffusé

Dans le cas d'une surface caractérisée par une distribution spatiale  $h(u)$  (Figure 58) en mouvement (vitesse  $\vec{v}$ ) par rapport au système émetteur-récepteur à fréquence  $f_0$ , le rapport entre le signal Doppler rétrodiffusé  $V_d$  et le signal émis  $V_1$  est donné par

$$\frac{V_d}{V_1} = -2jk \int_x T_e(x) T_r(x) h(x - vt) dx, \quad (\text{II.3.65})$$

$$= -2jk \int_x T_e(x) T_r(x) \times \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} H_n \exp\left(\frac{2i\pi n(x - vt)}{T_x}\right) dx, \quad (\text{II.3.66})$$

$$= -2jk \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} H_n \exp\left(\frac{-2i\pi nvt}{T_x}\right)}_{\text{spectre Doppler}} \times \underbrace{\int_x T_1(x) T_2(x) \exp\left(\frac{2i\pi nx}{T_x}\right) dx}_{\text{spectre spatial filtré}}. \quad (\text{II.3.67})$$

Dans le cas où le spectre Doppler ne possède qu'une seule fréquence  $f_D = \frac{2f_0 v \sin \theta}{c_0}$ , alors le spectre spatial  $f_s$  s'exprime par  $f_D = v f_s$ .

Pour analyser ce type de signaux, une interface Matlab® a été réalisée (Figure 59) dans le cadre du stage de master de Pierre Maréchal, permettant ainsi la visualisation des indicateurs statistiques et temps-fréquences utilisés.

C'est donc par l'utilisation d'indicateurs statistiques d'ordres supérieurs utilisés pour la caractérisation de tissus[81] comme le skewness  $Skew[x(t)] = \frac{E[x^3(t)]}{E[x^2(t)]^{3/2}}$  et le kurtosis  $Kurt[x(t)] = \frac{E[x^4(t)]}{E[x^2(t)]^2}$ , et une représentation temps-fréquence de type spectrogramme

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \Pi(\tau - t) \exp(-2i\pi f \tau) d\tau, \quad (\text{II.3.68})$$

où  $\Pi(\tau)$  est une fonction porte, que des changements de rugosité ont pu être détectés lors d'expériences en laboratoire (Figure 58b), et sur route par la détection de lignes blanches discontinues (Figure 58c), ou de passage piétons (Figure 59) identifiée *via* le logiciel d'acquisition développé à cet effet.

### 3.5.3 Mélanges des échelles et ordres de grandeurs

Si l'on considère l'approche multi-échelles à base d'espace PM et l'approche de la propagation dans les milieux complexes hystérétiques très simplifiée dans le cas de la propagation unipolaire présentée en partie 2.5.2, on constate qu'il devient indispensable de prendre en compte les conditions *a priori* d'excitation si l'on veut avancer dans la modélisation multi-échelles de la propagation acoustique des matériaux fissurés.

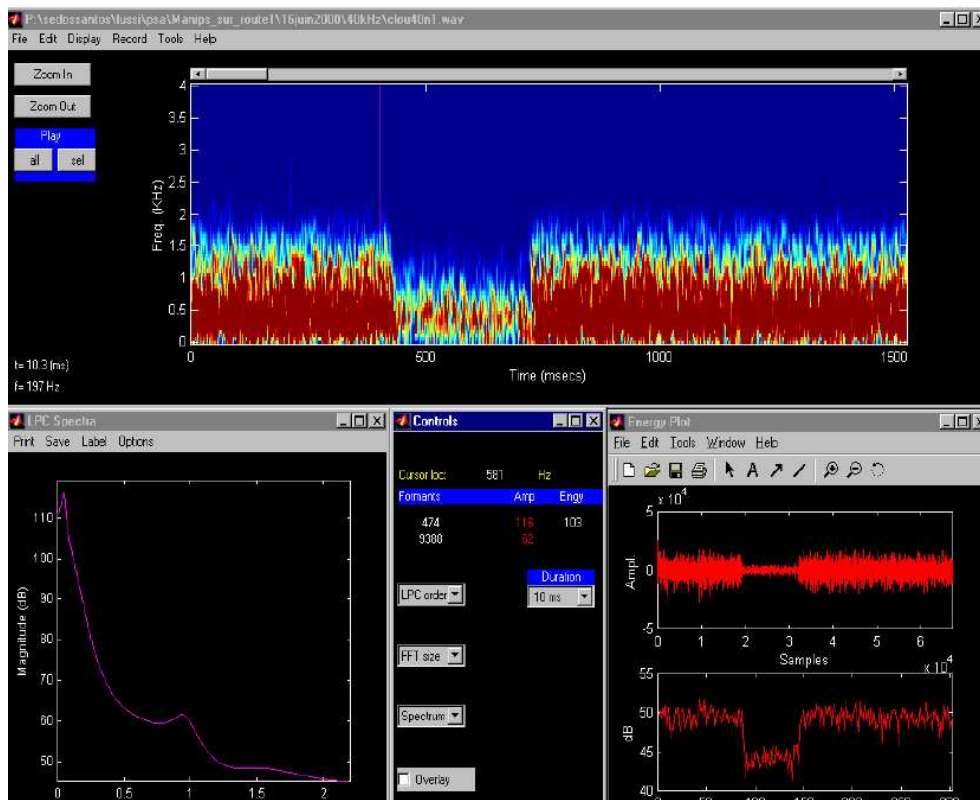


Figure 59 – Interface Matlab permettant la visualisation spectrale et temporelle des signaux Doppler rétrodiffusés

La modélisation basée à base d'espace PM montre qu'il est indispensable de mélanger les échelles et les ordres de grandeurs, conséquences spectrales des phénomènes de génération d'harmoniques. C'est ainsi que l'on pourra accéder, avec une mesure macroscopique (à l'échelle  $\lambda$ ), à une caractérisation sub-lambda.

### 3.5.4 Mélanges des échelles de temps courts et temps long

Les expériences de focalisation TR-NEWS utilisent ce mélange des temps long et des temps courts. En effet, plus la durée d'enregistrement de la coda initiale est longue, meilleure est la qualité de la réfoculation quantifiée par une localisation spatiale de la tache focale. L'exploitation de ce mélange de caractéristiques temporelles a été réalisée concrètement[14] par l'utilisation de cavités réverbérantes, appelées aussi cavités chaotiques (Figures 32 et 20b).

La notion de cavité chaotique a été introduite dans le travaux de Quieffin[120] qui montre que les phénomènes de réverbération, connus pour posséder de très grandes constantes de temps peuvent être reliés à des notions mettant en jeu des propriétés connues en dynamique non linéaire des systèmes complexes, comme les systèmes ergodiques, chaotiques, et mélangeants. Il est remarquable de constater que ces systèmes

macroscopiques caractérisés par des propriétés d'ensemble puissent être reliés à des quantités aussi petites que la notion de temps d'Heisenberg  $t_h = 2\pi \frac{\hbar}{\langle \Delta E \rangle} = \frac{2\pi}{\langle \Delta \omega \rangle} = 2\pi n_0$ , où  $n_0$  est la densité de modes théoriques dans le milieu,  $\Delta\omega$  représente l'écart fréquentiel moyen entre deux modes propres et  $\hbar = 1.05457148 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$ .

C'est aussi par l'exploration de phénomènes possédant de grandes constantes de temps comme la réverbération qu'on accédera à des signatures caractéristiques des phénomènes à mémoire présents lors de la fatigue et du vieillissement des matériaux. Néanmoins, cette approche se fera non sans renoncer aux hypothèses classiques de stationnarité des systèmes à analyser.

### 3.5.5 Mélanges des phénomènes physiques

#### Analogie optique-acoustique

À chaque ordre de grandeur est associé un phénomène physique prépondérant. Le mélange des ordres de grandeurs passe par un mélange des phénomènes physiques. Le développement de l'acoustique non linéaire suis désormais le développement de l'optique non linéaire[40, 55]. Ce fut le cas pour les systèmes de correction d'aberration de phase, et c'est le cas aujourd'hui de la conjugaison de phase, équivalent optique du retournement temporel acoustique linéaire.

C'est donc dans cette voie que s'inscrit le projet de recherche lié à l'utilisation de phénomènes acousto-optiques dans le but d'améliorer l'instrumentation acoustique non linéaire. Les expériences d'acousto-optiques démarées dans l'équipe dès 1999[19] dans le but de proposer une méthode d'étalonnage des champs acoustiques, ont été renforcées par des mesures interférométriques réalisées avec la sonde BMI jusqu'en 2004<sup>2</sup>, puis avec le vibromètre Polytec dans le cadre du projet AERONEWS (Figure 20) et récemment avec un laser utilisant la technologie photo-réfractive (société Bossa Nova) dans le cadre de la collaboration avec Alexander Sutin (Figure 60).

L'intérêt de privilégier les mesures optiques est multiple. Dans un premier temps, la métrologie semble aller en faveur des méthodes optiques qui se trouvent être étalonnées en pression, déplacement ou vitesse, variables utilisées en acoustique non linéaire. De plus, les effets mesurés étant acoustiques, il est plus commode d'utiliser des systèmes de mesure ne présentant pas de phénomènes acoustiques (cas des transducteurs). Enfin les progrès réalisés en terme de sensibilité et de détectabilité font des systèmes optiques d'excellents candidats pour les mesures nanométriques des effets acoustiques non linéaires souvent très faibles et noyés dans le bruit acoustique.

<sup>2</sup>Les premières expériences TR-NEWS ont été réalisées avec la sonde BMI (Figure 13)



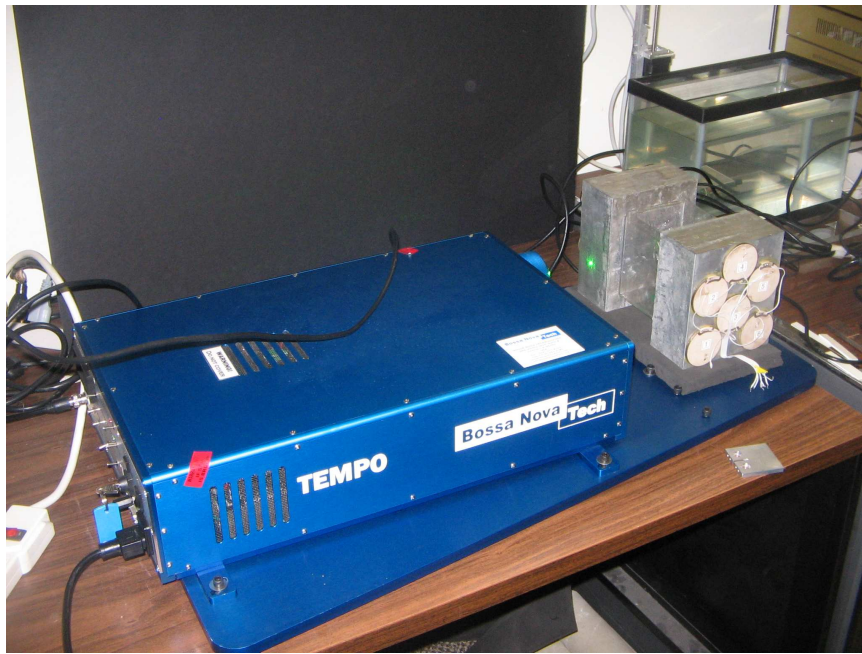


Figure 60 – Amélioration du système TR-NEWS avec un laser photo-réfractif -Artann Labs, USA, nov 2007

### Analogie interaction paramétrique - mélange d'ondes

L'approche systémique de l'instrumentation se construit également à partir de l'observation de l'analogie entre "interaction paramétrique" et "mélange d'ondes" qui permet de constater que le phénomène décrit comme une signature d'un phénomène acoustique non linéaire est équivalent au phénomène de microscopie multi-photons, interprété par la physique quantique linéaire (Figure 61). L'ensemble des phénomènes basés sur des mélanges d'ondes optiques (interaction 3 ondes, interaction 4 ondes, holographie, cristaux photoniques, redressement optique, instabilité modulationnelle, propagation soliton) donnent ou pourraient donner lieu à une application en acoustique non linéaire. C'est déjà le cas avec l'interaction paramétrique des ondes acoustiques que j'ai choisi de privilégier dès le début de cette activité de recherche, jusqu'à l'utilisation du retournement temporel que j'ai initié au LUSSI dans le cadre de la thèse de Thomas Goursolle, et jusqu'au phénomène d'instabilité modulationnelle, de propagation unipolaire et soliton ou d'interaction paramétrique 4 ondes qui permettrait de générer un réseau phononique dispersif dans lequel une propagation non linéaire de type soliton pourrait s'établir (Figure 62).

Cette approche systémique de l'instrumentation complète la modélisation systémique développée au cours des travaux théoriques et forment, eux aussi, la structure théorique d'analyse en optique non linéaire.

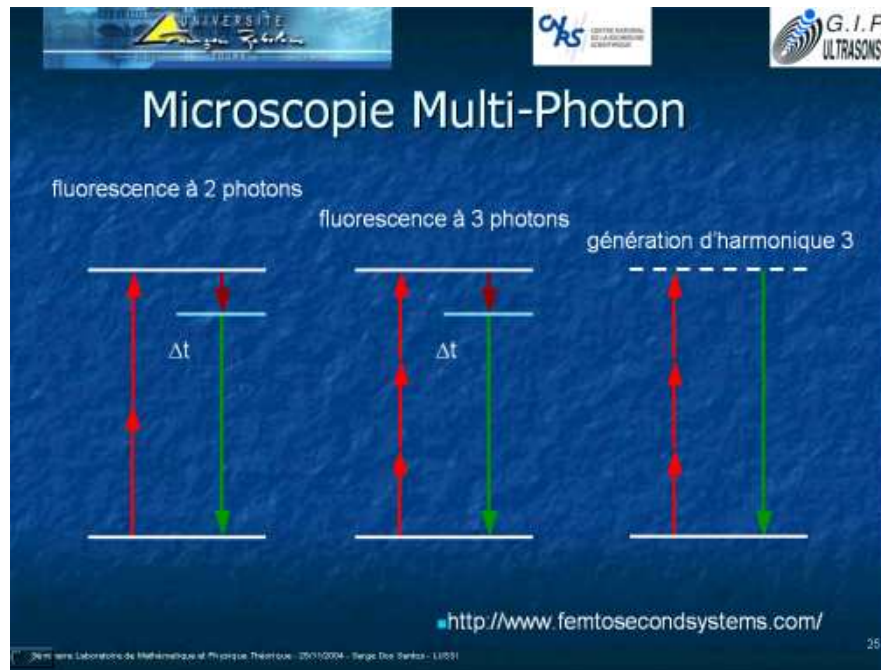


Figure 61 – *Analogie optique - acoustique pour l'interprétation de l'interaction paramétrique :*  
 $(h\nu = h\nu_1 + h\nu_2) \Leftrightarrow (f_+ = f_1 + f_2)$ [36]



Figure 62 – *Concept de propagation soliton proposée pour le CND[39] et validée lors du ISNA18[111]*

## Chapitre 4

# Avancées dans l'objectif et projet de recherche

Depuis 1999, date de mise en place de cet axe de recherche, un certain nombre d'avancées a permis de solidifier le socle de cette thématique de caractérisation non linéaire de matériaux complexes solides par ultrasons. L'équipe CUP est dotée de plusieurs dispositifs expérimentaux de mesure de nonlinéarité par modulation de phase (développés en 2002 et amélioré pour les matériaux bi-couches par Thomas Goursolle en collaboration avec F. Vander Meulen, L. Haumesser et J. Fortineau), et par TR-NEWS et NEWS-TR en collaboration avec S. Callé. L'équipe dispose également d'une expertise en terme de caractérisation laser puisque depuis les travaux présentés à IEEE 2000 utilisant le laser BMI, plusieurs études ont été menées avec des vibromètres Polytec, les lasers " knife-edge " développés par l'Université de Nottingham, et plus récemment avec la société Bossa Nova où des expériences TR-NEWS réalisées au sein de la société Artann Laboratories en 2007 ont permis de focaliser temporellement une impulsion acoustique d'amplitude évaluée à 200 nm sur une surface de 1mm de diamètre, dans un échantillon à géométrie complexe (figure 60).

Une tendance plutôt inattendue s'est révélée concernant les problématiques et le potentiel de l'approche non linéaire. En effet, l'équipe possède désormais une expertise en terme de mesure de nonlinéarité dans les transducteurs (problématique présentée au CFA2006[134]) en vue d'applications piézoélectriques (Réseau MIND par une thèse de Doctorat en cours démarrée à l'issue des travaux réalisés dans le cadre du projet AERONEWS en 2004-2005). Les méthodes d'interaction d'ondes ont permis d'ouvrir une nouvelle voie en 2007 au sein de l'équipe orientée sur l'interaction d'ondes acoustiques dans l'air. Celle-ci exploite les phénomènes de produit d'intermodulation de fréquence et est plutôt favorable expérimentalement à une bonne caractérisation non linéaire, plutôt que les méthodes utilisant la génération d'harmoniques qui reste très sensible aux effets non linéaires intrinsèques de la chaîne d'acquisition (problématique présentée au CFA2006[73]). À l'échelle internationale, la communauté acoustique exploite depuis peu les travaux réalisés concernant la modulation de phase (article cité 8

fois) et les méthodes TR-NEWS et NEWS-TR (article cité 3 fois depuis 2006). Du point de vue des applications, la complexité des matériaux analysés n'a cessé de progresser. Depuis les barreaux homogènes en aluminium proposés par Dassault Aviation en 2000, jusqu'aux structures composites collées à 140 plis proposées par un partenaire aéronautique suédois, l'évolution des méthodes a également été canalisée par l'évolution de la complexité des structures à analyser.

Enfin, la mise en évidence de l'intérêt de développer une approche plus systémique est un travail plus difficile à initier, mais semble sur la bonne voie également. La première étape semble acquise dans l'idée de proposer une excitation plus adaptée à la réalité de la nonlinéarité en renonçant à une approche purement harmonique. Le fait de favoriser l'interaction d'ondes par l'utilisation de deux fréquences ; le fait de mettre en jeu, dans la méthode de modulation de phase, plusieurs ordres de grandeurs dans les fréquences d'excitation pour la BF (2.5 MHz) et la HF (20 MHz) ; et enfin le fait d'utiliser une instrumentation acousto-optique, contribuent à cette démarche d'approche multi-échelles de l'excitation et de la réception qui nécessitera, dans le cadre d'une optimisation, une analyse systémique. C'est également dans le cadre de cette approche d'optimisation de l'excitation, que se sont développées les méthodes TR-NEWS et NEWS-TR qui utilisent plusieurs étapes dans la procédure d'excitation (excitation multiple initiale -réponse -retournement -réponse -analyse).

Cette voie, essentiellement basée sur un retour à la description temporelle, peut désormais bénéficier des progrès de l'électronique haute fréquence. En effet, grâce à l'utilisation des systèmes ultrasonores hautes fréquences, des systèmes de synchronisation de sources stables, et de méthodes d'excitation femto-seconde, la possibilité de générer des sources d'excitation acoustiques arbitraires permet d'entrevoir non seulement des formes d'excitations quelconques temporellement, mais aussi spatialement si on inclue les progrès réalisés sur les sondes multi-éléments dont quelques fournisseurs (Société M2M) proposent désormais cette nouvelle possibilité d'excitation arbitraire pour chaque élément de la sonde. La description temporelle est également implicitement sous-jacente dans le choix des méthodes de simulations de propagations acoustiques par codes pseudo-spectraux. En effet, ces codes de propagation, permettent de choisir la description temporelle pour les dérivées temporelles, mais de maintenir le caractère spectral pour le calcul des dérivées spatiales, particulièrement adapté dans le cas de propagation d'ondes.

Les objectifs de la thématique de recherche présentée s'inscrit ainsi dans une démarche initiée dès 1994 lors des premières études concernant les systèmes non linéaires discrets qui consistait à mettre en évidence le fait que l'énergie modale spectrale n'est pas une quantité conservée au cours du temps. Cette instabilité temporelle, conduisant à une modification du spectre par la création d'harmoniques, est la signature d'un comportement multi-échelles en temps également mis en évidence lors de ma Thèse de Doctorat qui portait sur la synchronisation des systèmes non linéaires. Expérimentalement, les expériences menées au LUSI et dédiées à la caractérisation non linéaire, devaient comporter ce principe d'analyse multi-échelles en temps par l'utilisation de plusieurs fréquences d'excitation (interaction paramétrique), puis par l'utilisation de



la symétrie d'invariance par renversement du temps. L'approche multi-échelles en espace, même si elle est liée à celle en temps dans les phénomènes de propagations d'ondes, est plus délicate à considérer globalement, mais a tout de même été abordée dans la Thèse de Thomas Goursolle pour la modélisation mesoscopique des zones fissurées par les espaces PM. Elle est également présente dans les matériaux complexes à réverbération importante et dans les matériaux périodiques comme les nouveaux composites pouvant produire des effets dispersifs couplant le temps et l'espace. Cette approche multi-échelles en temps, en espace et en paramètres est à la base de cette approche systémique nécessaire à la caractérisation ultrasonore non linéaire des propriétés sub-lambda des milieux complexes, à un ordre de grandeur inférieur à la limite classique de l'imagerie ultrasonore, et constituant un enjeu majeur de l'imagerie dans les contextes du CND, des applications médicales et des nanosystèmes.

## 4.1 L'enjeu de l'imagerie ultrasonore

Le défi de l'imagerie ultrasonore est de pouvoir imager les milieux de plus en plus complexes et d'en extraire des informations (au sens large) de plus en plus fiables (au sens large), c'est-à-dire plus précises en temps (localisation temporelle) sur la date et sur la durée d'un événement, plus précises en espace (localisation spatiale) sur la position et sur la taille d'un phénomène physique, et plus précises sur les paramètres intrinsèques de cette information. L'ensemble de ces caractéristiques doivent être abordées de façon systémique afin de proposer des innovations dans des applications telles que la caractérisation des milieux mous, en mouvement, dégradés, multi-échelles et de façon générale de nature complexe.

## 4.2 Contexte du CND

### 4.2.1 Enjeu des matériaux composites

Les matériaux composites font partie intégrante des objets de la vie quotidienne, allant de la raquette de badminton au Boeing 787, entièrement composite. L'éventail des géométries disponibles et leur composition hétérogène multi-couches et multi-directionnelles en font des matériaux particulièrement difficiles à contrôler. La complexité du matériau nécessite une caractérisation globale pour des dégradations qui sont identifiées localement (délamination, cracks, etc.). Ces matériaux présentent donc de multiples caractéristiques physiques : dispersion, atténuation, réflexions multiples et nonlinéarité induite par le processus de collage ou d'assemblage nécessaire à leurs fabrications. Les difficultés sont liées au fait que le matériau à l'état solide et la structure naissent simultanément pendant les phases de fabrication[116]. Le couplage entre ces caractéristiques est donc un enjeu en terme de CND des composites et certaines

méthodes proposées précédemment (comme la propagation soliton) pourrait apporter une innovation dans le domaine (Figure 63).

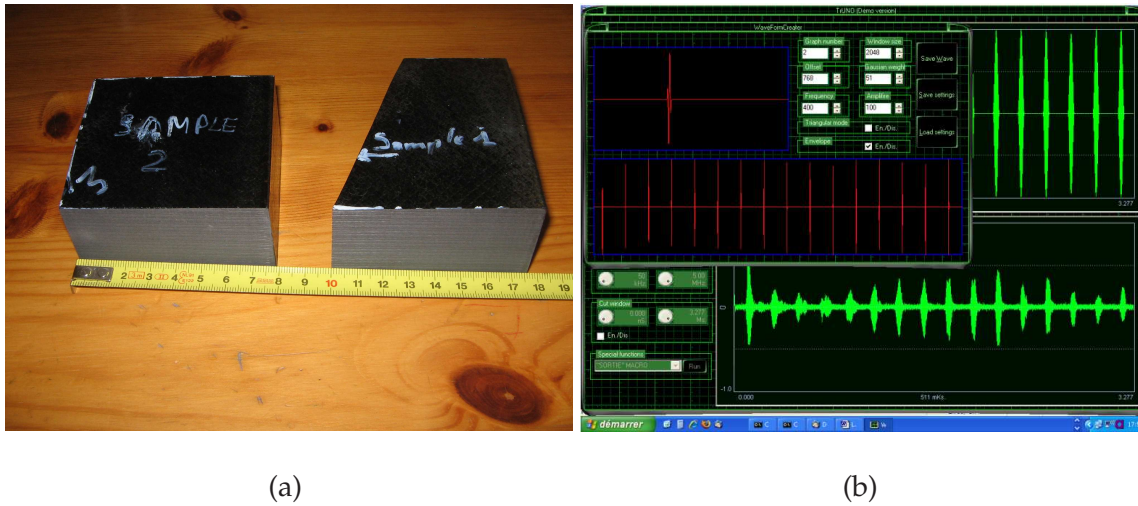


Figure 63 – Composites multi-couche (144 plis) de géométrie complexe (structure aéronautique) étudiés par une propagation de type impulsion gaussienne de fréquence centrale variable

#### 4.2.2 Physique complexe : contact, collage, adhésion

La physique des contacts, collages et adhésions présente des comportements complexes dont la modélisation est parfois difficile. L'exploration ultrasonore de ces phénomènes est en plein développement, notamment par des méthodes acoustiques non linéaires. La problématique associée a été initiée dans le cadre d'une collaboration avec l'IZFP (Figure 64) sur des échantillons proposés par Dassault Aviation, et le problème des forces moléculaires liées aux collages et aux contraintes résiduelles reste complexe et très ouvert.

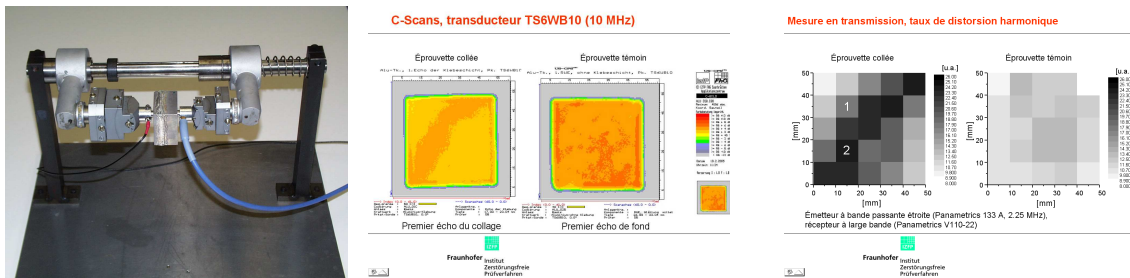


Figure 64 – Caractérisation linéaire et non linéaire des collages dans les échantillons d'aluminium proposés par Dassault Aviation en collaboration avec l'IZFP

## 4.3 Contexte des applications médicales

La complexité des milieux biologiques est sans doute supérieur à celle des milieux physiques dans la mesure où interviennent également d'autres processus comme les processus chimiques. La dynamique des systèmes non linéaires est également un moyen d'investigation des milieux biologiques, comme la synchronisation[35] des rythmes biologiques, la dynamique proies-prédateurs, et surtout dans les agents de contraste ultrasonores.

### 4.3.1 Instabilité modulationnelle des agents de contraste

Les agents de contraste ultrasonores permettent d'améliorer la qualité de l'imagerie échographique harmonique, en cardiologie et en radiologie notamment. La problématique de mode de vibration des bulles est un problème complexe de l'acoustique non linéaire et l'idée de faire vibrer la bulle dans un mode d'ordre supérieur (harmoniques sphériques  $Y_m^{(l)}$ ) et de le contrôler, présente la perspective d'améliorer l'imagerie, voir de délivrer des substances médicamenteuses par explosion de la bulle à un endroit précis et à un temps donné. Une localisation temporelle et spatiale de l'énergie vibrationnelle de la bulle est donc indispensable, et ne peut se produire qu'en présence d'une excitation de forte amplitude de façon à solliciter le phénomène d'instabilité modulationnelle (Figure 65). En effet, comme l'énergie associée à un mode de vibration d'un système non linéaire n'est pas un invariant au cours du temps, les conditions nécessaires pour observer le phénomène d'instabilité modulationnelle pourrait être étudiées pour permettre à la bulle d'atteindre le mode désiré, permettant ainsi la réalisation de l'image échographique ou permettant la diffusion de la substance présente dans la bulle. D'un point de vue théorique, l'étude exploiterait ce qui est connu en optique non linéaire concernant l'instabilité modulationnelle, étudié dans le cas des systèmes discrets non linéaires[90, 89]. De plus, la communauté acoustique non linéaire actuelle exploitent depuis quelques années l'analyse des symétries pour caractériser les milieux biologiques à bulles[112] et les travaux présentés précédemment s'inscrivent dans cette problématique actuelle.

### 4.3.2 Imagerie TR-NEWS de la dent humaine

Cette recherche dans le contexte du CND utilisant la caractérisation acoustique non linéaire des matériaux fissurés par TR-NEWS trouve une application inexplorée aujourd'hui qui consiste à caractériser les fissures à l'intérieur de la dent humaine ou animale.

Il s'agit d'analyser la dégradation de l'interface email-dentine par ultrasons utilisant la technique TR-NEWS. Le dispositif expérimental est constitué d'un système d'émission-



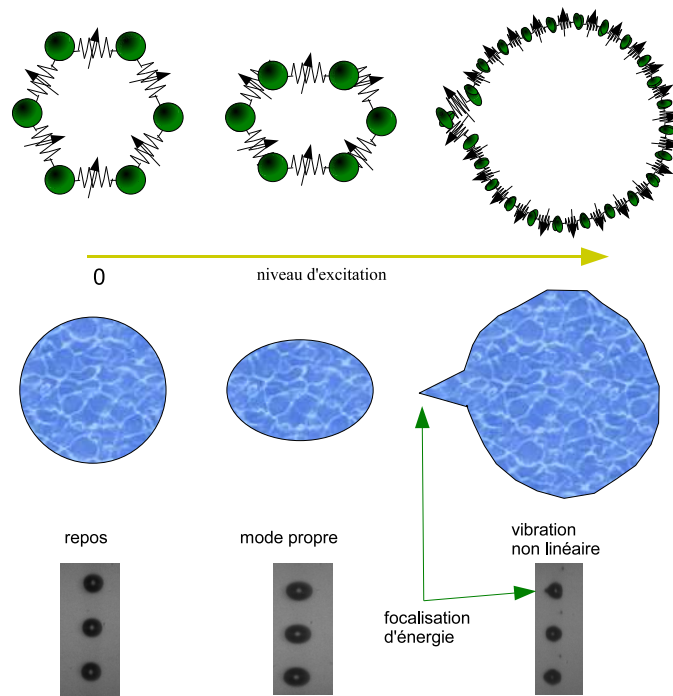


Figure 65 – Explosion d’une bulle (réseau bouclé 1D de  $N$  oscillateurs) engendrée par la localisation d’énergie, conséquence de l’instabilité modulationnelle des modes de vibration soumis à un fort niveau d’excitation acoustique (Avec l’amabilité de Ayache Bouakaz, INSERM U930, Tours). Le cas  $N = 6$ <sup>[34]</sup> pourrait être étendu à un modèle 3D

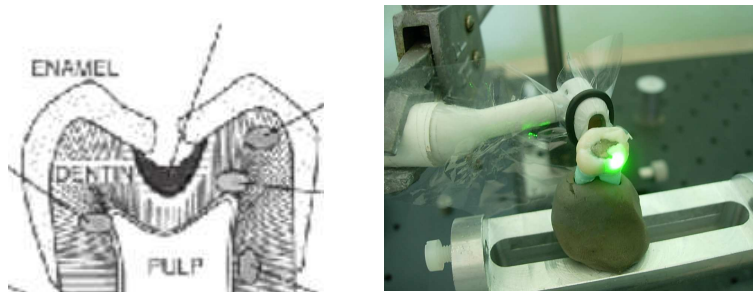


Figure 66 – Expérience TR-NEWS sur une dent humaine en vue de la caractérisation de l’interface email-dentine (utilisation d’une sonde laser BMI)

réception laser-transducteur (Figures 66 et 67), constitué d’un émetteur CND ultrasonore HF collé sur une molaire humaine et d’un interféromètre laser mesurant les vibrations acoustiques à la surface de cette dent. La signature non linéaire caractéristique de la région dégradée autour de cette interface éventuellement dégradée, se déduit alors de la nonlinéarité mesurée dans la réponse obtenue à partir de la méthode TR-NEWS. Cette réponse est extraite en exploitant la signature de la nonlinéarité évoquée précédemment (dépendance en amplitude, invariance par corrélation, par inversion d’impulsion, etc.).

Quelques résultats préliminaires ont été obtenus dans le cadre du stage de Master

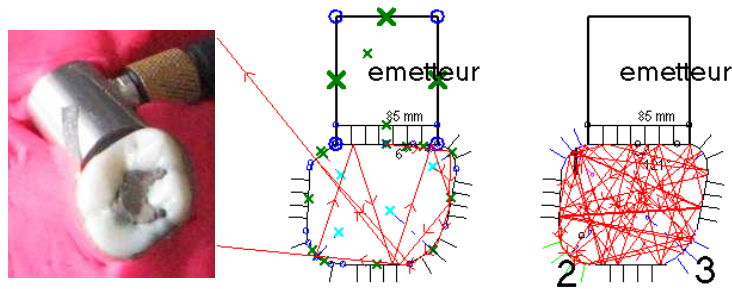


Figure 67 – Étude de la propagation complexe à l'intérieur de la dent par une approche simplifiée en rayons. Les rayons sortant aux positions 1, 2 et 3 correspondent aux vibrations mesurées par le vibromètre laser

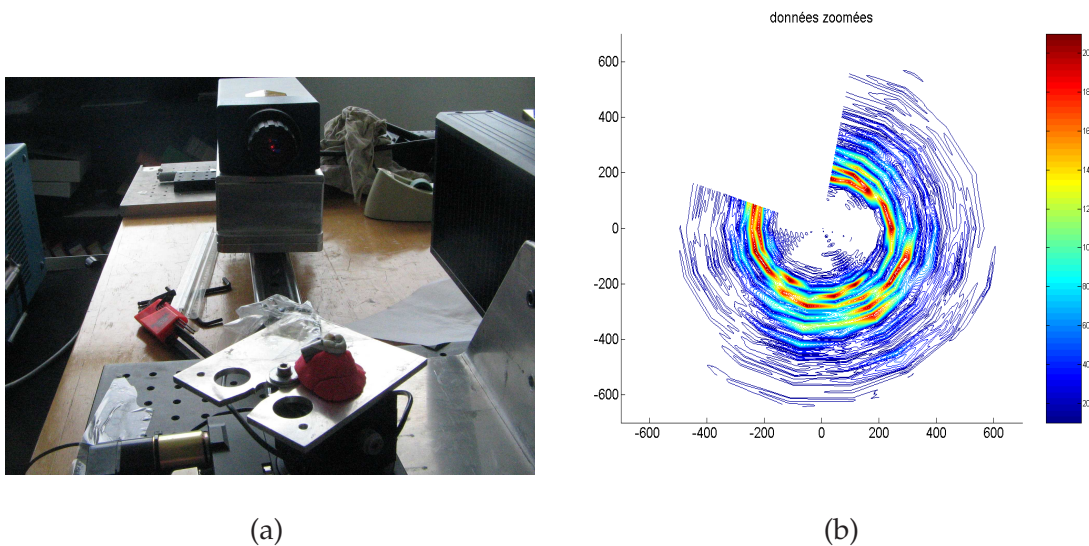


Figure 68 – Dispositif expérimental (a) de rotation à la base de l'imagerie TR-NEWS de la dent (sonde laser Polytec). Représentation polaire (b) du signal TR-NEWS décrivant la focalisation acoustique à la surface de la dent

de Mathieu Domenjoud (Figure 68). La position temporelle du pic de rétrofocalisation permet de définir l'origine des temps du signal renversé et de l'associer à une origine des espaces localisée à la surface de la dent par la position de la tache focale du laser. Un système de visualisation polaire permet d'obtenir une signature ultrasonore de l'intérieur de la dent

D'autres applications des travaux présentés pourrait s'insérer dans les problématiques actuelles de l'acoustique non linéaire, comme les phénomènes de clusterisation des agents de contraste, ou la synchronisation spatio-temporelle des agrégats de bulles.



## Annexes



## Annexe 1 : solutions de l'équation hystérétique

### Solution pour $n = -1/2$

Pour  $n = -1/2$ , Eq.(II.3.37) est une équation du 3ème ordre qui possède une solution réelle et deux solutions complexes conjuguées. La solution réelle s'écrit :

$$u_1(\xi, \theta) = \frac{-6K(\beta + \xi) + 2^{1/3} \left( 27K\theta + \sqrt{729K^2\theta^2 + 4(3K\beta + 3K\xi)^3} \right)^{2/3}}{32^{2/3} \left( 27K\theta + \sqrt{729K^2\theta^2 + 4(3K\beta + 3K\xi)^3} \right)^{1/3}}. \quad (1)$$

### Solution pour $n = -1/2$

Pour  $n = -1/2$ , Eq.(II.3.41) est une équation du 3ème ordre qui possède une solution réelle et deux solutions complexes conjuguées. La solution réelle s'écrit :

$$\begin{cases} u_1(\xi, \theta) = \frac{-6K(\beta + \xi) + 2^{1/3} \widetilde{u_1(\xi, \theta)}^{2/3}}{3(2^{2/3}) \widetilde{u_1(\xi, \theta)}^{1/3}} \\ \widetilde{u_1(\xi, \theta)} = 27K\theta + \sqrt{729K^2\theta^2 + 4(3K\beta + 3K\xi)^3} \end{cases} \quad (2)$$

**Solution pour  $n = 2$** 

Pour  $n = 2$ , Eq.(II.3.37) est une équation du 2nd ordre dont les solutions sont réelles ou complexes suivant les paramètres :

$$u_1(\xi, \theta) = \frac{1 + 2K^2\theta(\beta + \xi) - \sqrt{1 + 4K^2\theta(\beta + \xi)}}{2K^2(\beta + \xi)^2}, \quad (3)$$

**Solution for  $n = 3$** 

Pour  $n = 3$ , la complexité des solutions réelles augmente mais sont disponibles avec Mathematica® et l'une d'entre elle est donnée par

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(\xi, \theta) = -\frac{1 - 3\beta^2\theta - 6\beta\theta\xi - 3\theta\xi^2}{3(\beta^3 + 3\beta^2\xi + 3\beta\xi^2 + \xi^3)} \\ \quad - \frac{2^{1/3}(-1 + 6\beta^2\theta + 12\beta\theta\xi + 6\theta\xi^2)}{3(\beta^3 + 3\beta^2\xi + 3\beta\xi^2 + \xi^3)u_1(\xi, \theta)} \\ \quad + \frac{u_1(\xi, \theta)}{3(2^{1/3})(\beta^3 + 3\beta^2\xi + 3\beta\xi^2 + \xi^3)}, \\ \widetilde{u_1(\xi, \theta)} = \left( -2 + 18\beta^2\theta - 27\beta^4\theta^2 + 36\beta\theta\xi \right. \\ \quad - 108\beta^3\theta^2\xi + 18\theta\xi^2 - 162\beta^2\theta^2\xi^2 \\ \quad - 108\beta\theta^2\xi^3 - 27\theta^2\xi^4 \\ \quad \left. + 3\sqrt{3}\theta^{3/2}(\beta + \xi)^3 \right. \\ \quad \left. \times \sqrt{-4 + 27\beta^2\theta + 54\beta\theta\xi + 27\theta\xi^2} \right)^{1/3} \end{array} \right. \quad (4)$$



# Vérification des solutions avec Mathematica®

Cette démonstration [43] permet de vérifier l'exactitude des solutions mathématiques déterminées en partie 3.3.3.

Hysteretic Equation (rewritten without the absolut term) :

$$\begin{aligned} \text{Eqhyst} = & D[u1[\xi, \theta], \xi] D[u1[\xi, \theta], \xi] + V_M[\xi] D[u1[\xi, \theta], \xi] D[u1[\xi, \theta], \theta] \\ & + u1[\xi, \theta] (V_M[\xi] - u1[\xi, \theta]) D[u1[\xi, \theta], \theta] D[u1[\xi, \theta], \theta] \\ & u1[\xi, \theta] (-u1[\xi, \theta] + V_M[\xi]) u1^{(0,1)}[\xi, \theta]^2 + V_M[\xi] u1^{(0,1)}[\xi, \theta] u1^{(1,0)}[\xi, \theta] + u1^{(1,0)}[\xi, \theta]^2 \end{aligned}$$

Trivial solution for  $n = 1$  :

$$u1[\xi, \theta] = \frac{-G\alpha + K\alpha\theta}{K(\beta + \alpha\xi)}$$

$$\frac{-G\alpha + K\alpha\theta}{K(\beta + \alpha\xi)}$$

$$\begin{aligned} \text{Eqhyst} = & D[u1[\xi, \theta], \xi] D[u1[\xi, \theta], \xi] + V_M[\xi] D[u1[\xi, \theta], \xi] D[u1[\xi, \theta], \theta] \\ & + u1[\xi, \theta] (V_M[\xi] - u1[\xi, \theta]) D[u1[\xi, \theta], \theta] D[u1[\xi, \theta], \theta] \end{aligned}$$

$$\frac{\alpha^2(-G\alpha + K\alpha\theta)^2}{K^2(\beta + \alpha\xi)^4} - \frac{\alpha^2(-G\alpha + K\alpha\theta)V_M[\xi]}{K(\beta + \alpha\xi)^3} + \frac{\alpha^2(-G\alpha + K\alpha\theta)(-\frac{-G\alpha + K\alpha\theta}{K(\beta + \alpha\xi)} + V_M[\xi])}{K(\beta + \alpha\xi)^3}$$

**Simplify[Eqhyst]**

0

## Complex Solution

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{u1}[\xi, \theta] = \\
 & -\frac{1 - \frac{3\theta}{16} - \frac{3\theta\xi}{2} - 3\theta\xi^2}{3(\frac{1}{64} + \frac{3\xi}{16} + \frac{3\xi^2}{4} + \xi^3)} - \\
 & \frac{2^{1/3}(-1 + \frac{3\theta}{8} + 3\theta\xi + 6\theta\xi^2)}{3(\frac{1}{64} + \frac{3\xi}{16} + \frac{3\xi^2}{4} + \xi^3)(-2 + \frac{9\theta}{8} - \frac{27\theta^2}{256} + 9\theta\xi - \frac{27\theta^2\xi}{16} + 18\theta\xi^2 - \frac{81\theta^2\xi^2}{8} - 27\theta^2\xi^3 - 27\theta^2\xi^4 + 3\sqrt{3}\theta^{3/2}(\frac{1}{4} + \xi)^3\sqrt{-4 + \frac{27\theta}{16} + \frac{27\theta\xi}{2} + 27\theta\xi^2})^{1/3}} + \\
 & \frac{(-2 + \frac{9\theta}{8} - \frac{27\theta^2}{256} + 9\theta\xi - \frac{27\theta^2\xi}{16} + 18\theta\xi^2 - \frac{81\theta^2\xi^2}{8} - 27\theta^2\xi^3 - 27\theta^2\xi^4 + 3\sqrt{3}\theta^{3/2}(\frac{1}{4} + \xi)^3\sqrt{-4 + \frac{27\theta}{16} + \frac{27\theta\xi}{2} + 27\theta\xi^2})^{1/3}}{32^{1/3}(\frac{1}{64} + \frac{3\xi}{16} + \frac{3\xi^2}{4} + \xi^3)} \\
 & -\frac{1 - \frac{3\theta}{16} - \frac{3\theta\xi}{2} - 3\theta\xi^2}{3(\frac{1}{64} + \frac{3\xi}{16} + \frac{3\xi^2}{4} + \xi^3)} - \\
 & \frac{2^{1/3}(-1 + \frac{3\theta}{8} + 3\theta\xi + 6\theta\xi^2)}{3(\frac{1}{64} + \frac{3\xi}{16} + \frac{3\xi^2}{4} + \xi^3)(-2 + \frac{9\theta}{8} - \frac{27\theta^2}{256} + 9\theta\xi - \frac{27\theta^2\xi}{16} + 18\theta\xi^2 - \frac{81\theta^2\xi^2}{8} - 27\theta^2\xi^3 - 27\theta^2\xi^4 + 3\sqrt{3}\theta^{3/2}(\frac{1}{4} + \xi)^3\sqrt{-4 + \frac{27\theta}{16} + \frac{27\theta\xi}{2} + 27\theta\xi^2})^{1/3}} + \\
 & \frac{(-2 + \frac{9\theta}{8} - \frac{27\theta^2}{256} + 9\theta\xi - \frac{27\theta^2\xi}{16} + 18\theta\xi^2 - \frac{81\theta^2\xi^2}{8} - 27\theta^2\xi^3 - 27\theta^2\xi^4 + 3\sqrt{3}\theta^{3/2}(\frac{1}{4} + \xi)^3\sqrt{-4 + \frac{27\theta}{16} + \frac{27\theta\xi}{2} + 27\theta\xi^2})^{1/3}}{32^{1/3}(\frac{1}{64} + \frac{3\xi}{16} + \frac{3\xi^2}{4} + \xi^3)}
 \end{aligned}$$

$$\text{Eqhyst} = D[\mathbf{u1}[\xi, \theta], \xi]D[\mathbf{u1}[\xi, \theta], \xi] + V_M[\xi]D[\mathbf{u1}[\xi, \theta], \xi]D[\mathbf{u1}[\xi, \theta], \theta]$$

$$+ \mathbf{u1}[\xi, \theta](V_M[\xi] - \mathbf{u1}[\xi, \theta])D[\mathbf{u1}[\xi, \theta], \theta]D[\mathbf{u1}[\xi, \theta], \theta]$$

$$\text{Simplify}[\text{Eqhyst}]$$

0

## Annexe 3

Cette démonstration a été présentée lors du congrès [51] qui consistait à présenter l'algorithme de Lie développé pour rechercher les symétries des équations non linéaires. L'ensemble de l'équation de diffusion est traité. Cet algorithme permet de déterminer la structure complète du groupe de Lie associé à l'équation de diffusion.

### Mathematica Lie Algorithm Computation for Finding Infinitesimals Symmetries of the Heat Equation Reduction and Solving of the Heat Equation

(\* Initialization of the quantities needed for the computation \*)

```
Begin["LieAlgo"];
IndpdtVars = Sequence[t, x];
Eq := U1 - U2,2
RempVar = U1;
TestVar = 0;
```

(\* Lie Algorithm -> Outputs the Determining Equations of the Heat Equation \*)

```
xp := {IndpdtVars}[[p]]
n := Length[{IndpdtVars}]
AllVars := Sequence[IndpdtVars, U1]
DrvDpdt := Table[D[U1, xp, NonConstants → D1], {p, n}]
DrvDpdt2 := Table[D[Up, xq, NonConstants → D1], {p, n}, {q, n}]
DD := Flatten[Join[{U1}, Join[DrvDpdt, DrvDpdt2]]]
Drv := Table[Up, {p, n}];
Drv2 := Table[Up,q, {p, n}, {q, n}]
D1 := Flatten[Join[{U1}, Join[Drv, Drv2]]]
Dpdt2Indpdt := Dispatch[Thread[DD → D1]]
xn+1 := U1
Prolong1[p_] := D[ξn+1[AllVars], xp, NonConstants → D1] - ∑μ=1n (UμD[ξμ[AllVars], xp, NonConstants → D1])
ProlongInf1 := Array[Prolong1, n]
η{p} := ProlongInf1[[p]]/.Dpdt2Indpdt
Prolong2[p_, q_] := D[η{p}, xq, NonConstants → D1] - ∑μ=1n Up,μD[ξμ[AllVars], xq, NonConstants → D1]
ProlongInf2 := Array[Prolong2, {n, n}]
η{p,q} := ProlongInf2[[p]][[q]]/.Dpdt2Indpdt
```

```

X :=  $\sum_{\mu=1}^{n+1} \zeta_{\mu} [\text{AllVars}] \partial_{x_{\mu}} \# + \sum_{\mu=1}^n \eta_{\{\mu\}} \partial_{U_{\mu}} \# + \sum_{\mu=1}^n \sum_{\nu=1}^n \eta_{\{\mu, \nu\}} \partial_{U_{\mu, \nu}} \# \&$ 
Sol = Solve[Eq == 0, RempVar];
Chgmt = Flatten[Sol];
Determ := X[Eq] /. Chgmt
CoeffNuls := Sort[DeleteCases[Flatten[Simplify[CoefficientList[Determ, Flatten[Join[Drv, Drv2]]]], _Integer]]
EqDert := Thread[CoeffNuls == 0]
ED := Simplify[TableForm[EqDert]]
ED

```

$$\begin{aligned}
\zeta_1^{(0,0,1)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_1^{(0,0,1)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_1^{(0,0,2)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_2^{(0,0,2)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_1^{(0,1,0)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_1^{(0,1,0)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_2^{(0,0,1)}[t, x, U1] + \zeta_1^{(0,1,1)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_3^{(0,0,2)}[t, x, U1] &== 2\zeta_2^{(0,1,1)}[t, x, U1] \\
2\zeta_2^{(0,1,0)}[t, x, U1] + \zeta_1^{(0,2,0)}[t, x, U1] &== \zeta_1^{(1,0,0)}[t, x, U1] \\
2\zeta_3^{(0,1,1)}[t, x, U1] + \zeta_2^{(1,0,0)}[t, x, U1] &== \zeta_2^{(0,2,0)}[t, x, U1] \\
\zeta_3^{(0,2,0)}[t, x, U1] &== \zeta_3^{(1,0,0)}[t, x, U1]
\end{aligned}$$

(\* These are the Determining Equations of the Heat Equation that provides conditions on the Infinitesimals symmetries of the equation \*)

```

(*)
Theequations
 $\zeta_1^{(0,0,1)}[t, x, U1] == 0$ 
 $\zeta_1^{(0,1,0)}[t, x, U1] == 0$ 
giveus :
*)

```

$$\zeta_1[t, x, U1] := \zeta_1[t]$$

(\* Let's execute the algorithm again with the result given above \*) (\* This command ED calls out a computation of the algorithm and outputs the new determining equations \*)

ED

$$\begin{aligned}
\zeta_2^{(0,0,1)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_2^{(0,0,2)}[t, x, U1] &== 0 \\
\zeta_1'[t] &== 2\zeta_2^{(0,1,0)}[t, x, U1] \\
\zeta_3^{(0,0,2)}[t, x, U1] &== 2\zeta_2^{(0,1,1)}[t, x, U1] \\
2\zeta_3^{(0,1,1)}[t, x, U1] + \zeta_2^{(1,0,0)}[t, x, U1] &== \zeta_2^{(0,2,0)}[t, x, U1] \\
\zeta_3^{(0,2,0)}[t, x, U1] &== \zeta_3^{(1,0,0)}[t, x, U1]
\end{aligned}$$

(\*  
 Thistime, let's use equation  
 $\zeta_2^{(0,0,1)}[t, x, U1] == 0$   
 \*)

$$\zeta_2[t, x, U1] := \zeta_2[t, x]$$

ED

$$\begin{aligned}\zeta_1'[t] &== 2\zeta_2^{(0,1)}[t, x] \\ \zeta_3^{(0,0,2)}[t, x, U1] &== 0 \\ \zeta_2^{(0,2)}[t, x] &== \zeta_2^{(1,0)}[t, x] + 2\zeta_3^{(0,1,1)}[t, x, U1] \\ \zeta_3^{(0,2,0)}[t, x, U1] &== \zeta_3^{(1,0,0)}[t, x, U1]\end{aligned}$$

(\* And so on ...\*)

**DSolve[EqDert[[1]],  $\zeta_2[t, x]$ , {t, x}]**

$$\{\{\zeta_2[t, x] \rightarrow C[1][t] + \frac{1}{2}x\zeta_1'[t]\}\}$$

$$\zeta_2[t, x] := \zeta_2[t] + \frac{1}{2}xD[\zeta_1[t], t]$$

ED

$$\begin{aligned}\zeta_3^{(0,0,2)}[t, x, U1] &== 0 \\ 2\zeta_2'[t] + x\zeta_1''[t] + 4\zeta_3^{(0,1,1)}[t, x, U1] &== 0 \\ \zeta_3^{(0,2,0)}[t, x, U1] &== \zeta_3^{(1,0,0)}[t, x, U1]\end{aligned}$$

$$\zeta_3[t, x, U1] := \zeta_3[t, x] + U1f[t, x]$$

ED

$$\begin{aligned}2\zeta_2'[t] + x\zeta_1''[t] + 4f^{(0,1)}[t, x] &== 0 \\ U1f^{(0,2)}[t, x] + \zeta_3^{(0,2)}[t, x] &== U1f^{(1,0)}[t, x] + \zeta_3^{(1,0)}[t, x]\end{aligned}$$

**DSolve[EqDert[[1]], f[t, x], {t, x}]**

$$\{\{f[t, x] \rightarrow C[1][t] - \frac{1}{2}x\zeta_2'[t] - \frac{1}{8}x^2\zeta_1''[t]\}\}$$

$$f[t, x] := f[t] - \frac{x}{2}D[\zeta_2[t], t] - \frac{x^2}{8}D[\zeta_1[t], t, t]$$

ED

$$\frac{1}{4}U1\zeta_1''[t] + U1(f'[t] - \frac{1}{8}x(4\zeta_2''[t] + x\zeta_1^{(3)}[t])) + \zeta_3^{(1,0)}[t, x] == \zeta_3^{(0,2)}[t, x]$$

**Collect[CoeffNuls[[1]], {x, U1}]**

$$U1(f'[t] + \frac{1}{4}\zeta_1''[t]) - \frac{1}{2}U1x\zeta_2''[t] - \frac{1}{8}U1x^2\zeta_1^{(3)}[t] - \zeta_3^{(0,2)}[t, x] + \zeta_3^{(1,0)}[t, x]$$

$$\zeta_1[t] := C_1 + C_2t + C_3t^2$$

$$\zeta_2[t] := C_4 + C_5t$$

**Simplify[TableForm[EqDert]]**

$$\frac{U1C_3}{2} + U1f'[t] + \zeta_3^{(1,0)}[t, x] == \zeta_3^{(0,2)}[t, x]$$

$$\text{DSolve}[\frac{U1C_3}{2} + U1f'[t] == 0, f[t], t]$$

$$\{\{f[t] \rightarrow C[1] - \frac{tC_3}{2}\}\}$$

$$f[t] := C_6 - \frac{tC_3}{2}$$

**Simplify[TableForm[EqDert]]**

$$\zeta_3^{(0,2)}[t, x] == \zeta_3^{(1,0)}[t, x]$$

(\*  $\zeta_3[t, x]$  is a solution of Heat Equation \*)

(\* We found out the Infinitesimal Symmetries of the Heat Equation, let's print them out \*)

**Do[Print[ $\zeta_i[t, x, U1]$ ], {i, 3}]**

$$C_1 + tC_2 + t^2C_3$$

$$\frac{1}{2}x(C_2 + 2tC_3) + C_4 + tC_5$$

$$U1(-\frac{tC_3}{2} - \frac{x^2C_3}{4} - \frac{x^2C_5}{2} + C_6) + \zeta_3[t, x]$$

$$XX := \zeta_1[\text{AllVars}]dt + \zeta_2[\text{AllVars}]dx + \zeta_3[\text{AllVars}]dU1$$

$$CC := \text{Table}[C_i, \{i, 6\}]$$

$$X_i := \text{Coefficient}[XX, CC[[i]]]$$

**Do[Print["X"<sub>i</sub>, "=", X<sub>i</sub>], {i, 6}]**

$$X_1 = dt$$

$$X_2 = dt + \frac{dx}{2}$$

$$X_3 = dt^2 - \frac{dU1tU1}{2} + dx tx - \frac{1}{4}dU1U1x^2$$

$$X_4 = dx$$

$$X_5 = dx t - \frac{dU1U1x}{2}$$

$$X_6 = dU1U1$$

$$XX_1 := \partial_t \# \&$$

$$XX_2 := t \partial_t \# + \frac{x}{2} \partial_x \# \&$$

$$XX_3 := t^2 \partial_t \# - \frac{tU1}{2} \partial_{U1} \# + tx \partial_x \# - \frac{1}{4} U1 x^2 \partial_{U1} \# \&$$

$$XX_4 := \partial_x \# \&$$

$$XX_5 := t \partial_x \# - \frac{xU1}{2} \partial_{U1} \# \&$$

$$XX_6 := U1 \partial_{U1} \# \&$$

$$\text{Commut} := \text{Table}[\text{Expand}[XX_i[X_j] - XX_j[X_i]], \{i, 6\}, \{j, 6\}]$$

$$\text{TableForm}[\text{Commut}]$$

0	dt	2dtt - $\frac{dU1U1}{2}$ + dx	0	dx	0
-dt	0	dt <sup>2</sup> - $\frac{dU1tU1}{2}$ + dx tx - $\frac{1}{4}$ dU1U1x <sup>2</sup>	- $\frac{dx}{2}$	$\frac{dx}{2} - \frac{dU1U1x}{4}$	0
-2dtt + $\frac{dU1U1}{2}$ - dx x	-dtt <sup>2</sup> + $\frac{dU1tU1}{2}$ - dx tx + $\frac{1}{4}$ dU1U1x <sup>2</sup>	0	-dx t + $\frac{dU1U1x}{2}$	0	0
0	$\frac{dx}{2}$	dx t - $\frac{dU1U1x}{2}$	0	- $\frac{dU1U1}{2}$	0
-dx	- $\frac{dx}{2} + \frac{dU1U1x}{4}$	0	$\frac{dU1U1}{2}$	0	0
0	0	0	0	0	0

0	X <sub>1</sub>	- $\frac{X_6}{2} + 2X_2$	0	X <sub>4</sub>	0
-X <sub>1</sub>	0	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	$\frac{X_5}{2}$	0
$\frac{X_6}{2} - 2X_2$	-X <sub>3</sub>	0	-X <sub>5</sub>	0	0
0	$\frac{X_4}{2}$	X <sub>5</sub>	0	- $\frac{X_6}{2}$	0
-X <sub>4</sub>	- $\frac{X_5}{2}$	0	$\frac{X_6}{2}$	0	0
0	0	0	0	0	0

(\* Now let's compute the reduction of the Heat Equation using the operator X<sub>2</sub> \*)

End[];

$$\text{HeatEquation} := D[U[t, x], t] - D[U[t, x], x, x]$$

$$(*X_2 = t\partial_t + \frac{x}{2}\partial_x*)$$

(\* The characteristic equation for X<sub>2</sub> is \*)

$$(*\frac{dt}{t} = 2\frac{dx}{x}*)$$

Begin["Reduction"];

$$\text{DSolve}[\frac{Dt[t[x]]}{t[x]} == 2\frac{Dt[x]}{x}, t[x], x]$$

$$\{\{t[x] \rightarrow x^2 C[1]\}\}$$

(\*  $\beta = \frac{t}{x^2}$  is an invariant of the equation. Let's rather use  $\alpha = \frac{x}{\sqrt{t}}$  \*)



(\* In order to reduce the equation , we'll replace the old variable  $U[t, x]$  by  $V[\alpha]$  \*)

$$\alpha := \frac{x}{\sqrt{t}}$$

$$U[t, x] := V[\alpha]$$

**HeatEquation**

$$-\frac{xV'[\frac{x}{\sqrt{t}}]}{2t^{3/2}} - \frac{V''[\frac{x}{\sqrt{t}}]}{t}$$

**HE := HeatEquation /. {x → μ√t}**

**HE**

$$-\frac{\mu V'[\mu]}{2t} - \frac{V''[\mu]}{t}$$

(\* The resulting equation now depends only on the new variable  $\mu$  \*)

$$\text{ReducedHE} := -\frac{\mu V'[\mu]}{2} - V''[\mu]$$

**DSolve[{ReducedHE == 0}, V[μ], μ]**

$$\{\{V[\mu] \rightarrow C[2] + \sqrt{\pi}C[1]\text{Erf}[\frac{\mu}{2}]\}\}$$

(\* Boundary conditions :  $V[0] == 0$  ,  $V[\infty] == 1$  \*)

(\* The solution of the reduced Heat Equation is given by : \*)

$$V[\mu] := 1 - \int_0^{\frac{\mu}{2}} \text{Exp}[-y^2] dy$$

$$V[\mu]$$

$$1 - \frac{1}{2}\sqrt{\pi}\text{Erf}[\frac{\mu}{2}]$$

$$U[t, x] := 1 - \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{t}}} \text{Exp}[-y^2] dy$$

$$U[t, x]$$

$$1 - \frac{1}{2}\sqrt{\pi}\text{Erf}[\frac{x}{2\sqrt{t}}]$$

(\* This is the classical solution of the Heat Equation. \*)

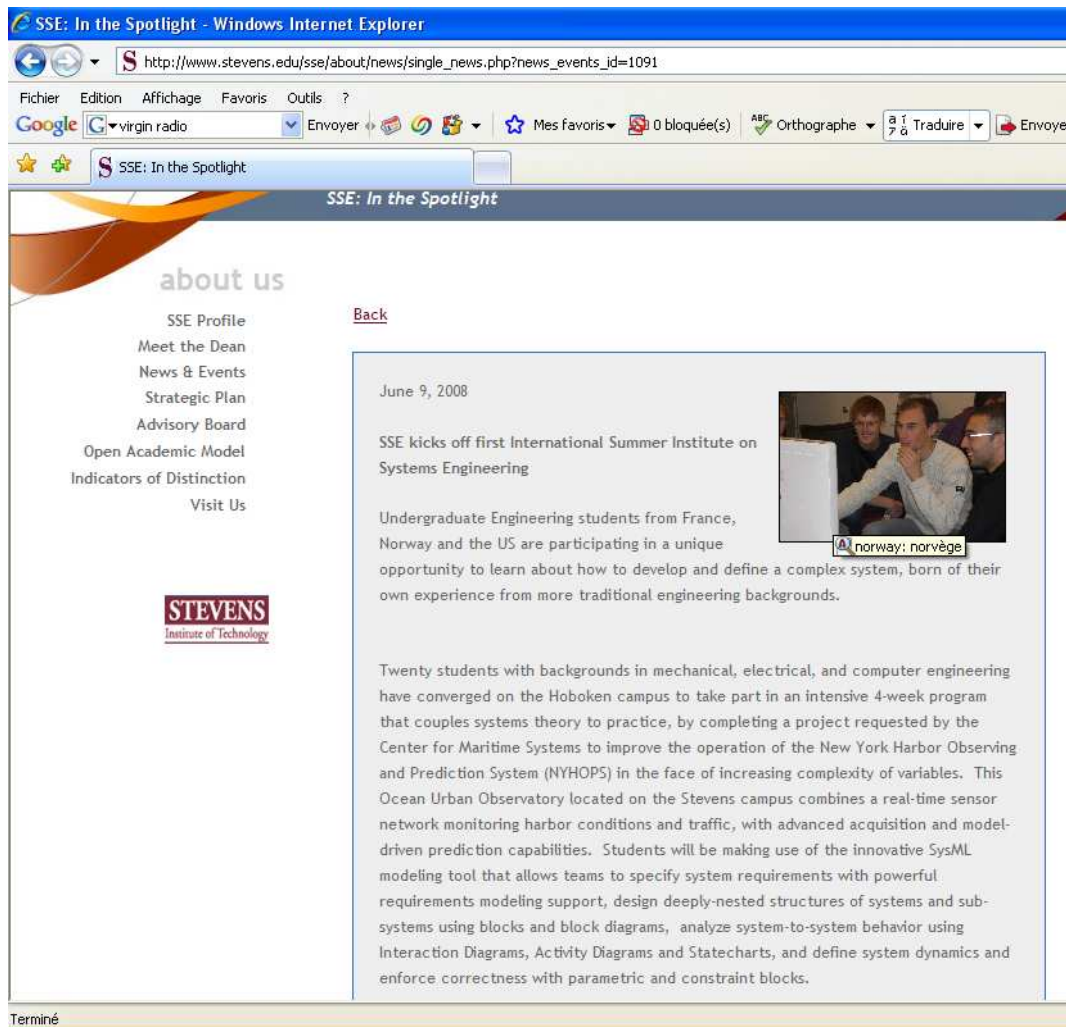
**Simplify[HeatEquation]**

0

## Annexe 4

### Collaboration ENIVL -Stevens Institute of Technology

Site Internet présentant les élèves ENIVL en formation au **Stevens Institute of Technology**, New York, USA (juin 2008), sur l'Ingénierie des Systèmes Complexes.



## Plaquette de l'option SAI de l'EIVL (1999-2003)

### OPTION S A I SYSTÈMES AUTOMATISÉS & INSTRUMENTATION

Responsables : Serge DOS SANTOS  
Marc LETHIECQ

#### OBJECTIF DE LA FORMATION

■ Cette option d'approfondissement en dernière année de l'Ecole a pour objectif de préparer les élèves aux métiers d'ingénieur d'étude/conception et ingénieur méthodes/industrialisation. Tous les secteurs de l'industrie mettant en œuvre des systèmes de production et/ou de l'instrumentation de mesure sont concernés : électricité/électronique, biens de consommation, automobile et transports terrestres, aéronautique (systèmes embarqués), industrie pharmaceutique, instrumentation médicale, télécommunications.

■ Les enseignements se concentrent sur :

- L'automatique.
- L'électronique d'instrumentation, les capteurs et actionneurs.
- L'informatique industrielle.
- Les systèmes industriels.
- La gestion et l'organisation industrielles.

■ L'équipe enseignante est constituée d'une vingtaine de spécialistes, pour moitié des enseignants permanents de l'EIVL et pour moitié des intervenants extérieurs, industriels ou enseignants-chercheurs.



Ecole d'Ingénieurs du Val de Loire

Spécialisation  
de fin d'études  
(5<sup>ème</sup> année)

### SYSTÈMES AUTOMATISÉS & INSTRUMENTATION

Responsables : Serge DOS SANTOS  
Marc LETHIECQ



#### EIVL

Rue de la Chocolaterie  
BP 3410  
41034 BLOIS CEDEX  
Tél. 02 54 55 84 00 • Fax 02 54 55 84 41  
e-mail : eivl@univ-tours.fr  
www.eivl.univ-tours.fr



#### CONTENU DE LA FORMATION

Le programme d'option constitue un approfondissement des enseignements de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> années en Génie Electrique, Informatique Industrielle et Génie des Systèmes. Le cycle de formation se compose d'une période de 6 mois consacrée aux cours - travaux dirigés - travaux pratiques et projet d'option (septembre à février), suivi d'un stage en entreprise de 5 à 6 mois. Les enseignements proposés se regroupent en Unités d'Enseignement (UE) d'une durée moyenne de 75 heures.

#### UE - Automatique et Informatique Industrielle

- Modélisation et automatique des systèmes séquentiels
- Régulation et automatismes industriels
- Réseaux de terrain et superviseurs
- Traitement d'images

#### UE - Instrumentation

- Actionneurs - Principe et commande
- Capteurs industriels
- Bruit et conditionnement de signaux
- Acquisition et traitement temps réel de signaux

#### UE - Systèmes

Cette UE aborde différents aspects des systèmes de production et des systèmes de mesure. Son contenu est défini chaque année en concertation avec les élèves de façon à s'adapter à leurs objectifs professionnels.

#### Tronc commun Ingénierie des Systèmes Industriels

- Gestion industrielle
- Filtrage numérique
- Acoustique
- Moteurs thermiques

#### Tronc commun 5<sup>ème</sup> année

- Gestion de projet
- Innovation et propriété industrielle
- Droit des entreprises et international
- Plans d'expériences
- Contrôle non-destructif
- Anglais

#### Ces enseignements sont complétés par :

- Un projet d'option (144 heures)
- Des conférences d'industriels
- Un stage industriel constituant une première expérience : 5 à 6 mois en entreprise.

Les élèves qui le souhaitent pourront préparer un DEA en parallèle avec cette option en vue d'une carrière d'ingénieur de recherche.

Débouchés et stages :  
AIR LIQUIDE, BK-MEDICAL, BOSCH, FAURECIA,  
GIAT INDUSTRIES, NSI, PEUGEOT-CITROEN, PFIZER,  
RENAULT S.A., ST GOBAIN, THALES, UNILOG...

# Plaquette du projet Européen AERONEWS (2004-2008)

## Participants:

Katholieke Universiteit Leuven, Belgium  
Prof. VAN DEN ABEELE Koen  
koen.vandenabeele@kula.ac.be

Vrije Universiteit Brussel, Belgium  
Prof. GUILLAUME Patrick  
patrick.guillaume@vub.ac.be

N.V. ASCO Industries, Belgium  
Ir. VAN DER LINDEN Geert  
geert.van.der.linden@asco.be

Diagnostic Centre DAKEL, Czech Republic  
Dr. ABRHAM Petr  
dakel@id.cz

Institute of Thermomechanics, Czech Republic, Prof. PREVOROVSKY Zdenek  
zp@it.cas.cz

Vyzkumny a zkusebni letecky ustav (VZLU), Czech Republic, Ing. VRHEL Jiri  
vrhel@vzlu.cz

GIP Ultrasons, France  
Dr. DOS SANTOS Serge  
dossantos@univ-tours.fr

NDT Expert, France  
Dr. Eng. PAGNOUX-LACAZE Elisabeth  
e.pagnoux@ndt-expert.fr

Fraunhofer Institut fuer zerstoeungsfreie Pruefverfahren (IZFP), Germany  
Dr. HIRSEKORN Signun  
signun.hirsekom@izfp.fraunhofer.de

Politecnico di Torino, Italy  
Prof. DELSANTO Pier Paolo  
pier.delsanto@polito.it

Università di Napoli, Italy  
Dr. VISCARDI Massimo  
leonardo@unina.it

Consejo Superior De Investigaciones Cientificas, Spain, Dr. CAMPOS Cleofe  
ccampos@ia.csic.es

Boeing Research & Technology Center, Spain, Mr. LACORT Benigno  
benigno.lacort@boeing.com

CSM Materialteknik, Sweden  
Dr. MATTEI Christophe  
christophe.mattei@csm.se

The University of Exeter, UK  
Dr. SAVAGE Luke  
l.savage@ex.ac.uk

The University of Bristol, UK  
Dr. DRINKWATER Bruce  
b.drinkwater@bristol.ac.uk

The University of Nottingham, UK  
Prof. SOMEKH Michael  
mike.somekh@nottingham.ac.uk

Cranfield University, UK  
Dr. MEO Michele  
m.meo@cranfield.ac.uk



Interested parties, companies, institutes and applicants to join the AERONEWS user-group should address the coordinator.  
More: [www.kulak.ac.be/AERONEWS](http://www.kulak.ac.be/AERONEWS)

## HEALTH MONITORING OF AIRCRAFT

### BY NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY

## AERONEWS

EC SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME  
PRIORITY 4: AERONAUTICS AND SPACE  
SPECIFIC TARGETED RESEARCH: FP6-502527



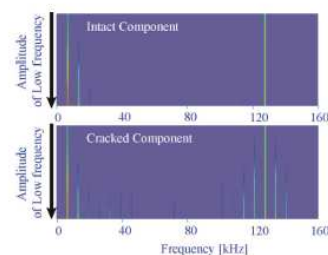
### Coordinator:

Katholieke Universiteit Leuven  
Prof. VAN DEN ABEELE Koen  
Interdisciplinary Research Center  
Nonlinear Acoustics Laboratory  
KULAK  
Belgium

## HEALTH MONITORING OF AIRCRAFT BY NONLINEAR ELASTIC WAVE SPECTROSCOPY

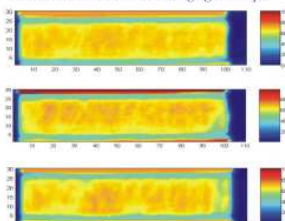
Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) and related acoustic and ultrasonic methods comprise a new class of innovative non-destructive techniques that provide extreme sensitivity in detecting and imaging incipient damage in the form of microcracks or delaminations, weakening of adhesive bonds, thermal and chemical damage, etc. The sensitivity and applicability of nonlinear methods to damage are superior to those obtained by currently used technologies. NEWS methods are in various stages of development and have not yet been applied to aircraft health monitoring. The project's goal is to examine, confirm and exploit the successful results of these techniques, using fundamental materials research on fatigue loading, and to apply them to the particular field of aeronautics. The project includes progressive microdamage and fatigue monitoring of aircraft components and structures, sensor engineering, development of NEWS-based imaging methods, and fundamental research on the modelling of meso-scale damage phenomena. We aim to investigate the relation of these

studies to the macroscopic behaviour of progressively fatiguing materials, and formulate the design of a unique system for microdamage inspection, including remote control and communication tools, and the completion of a full-scale model validation. The long-term goal of the project (5-10 years) is to monitor while in operation, the integrity of airframes and aircraft engines, and helicopter rotor systems. The development of this innovative NEWS-based technology and its engineering applications to aeronautics, will result in an enhanced, reliable and integrated measurement system and protocol for microcrack diagnostics of aircraft components and structures. We expect this development to result in a significant increase in aircraft and passenger safety while contributing to a substantial cost savings through a decrease in maintenance and operating times.

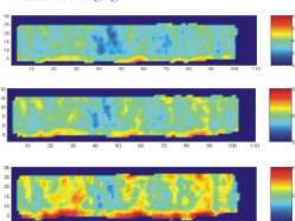


Intensity plots of intermodulation response spectra of intact and cracked components as a result of low and high frequency excitation (K. Van Den Abeele, P.A. Johnson, A. Sutin)

Classical Ultrasonic C-scan Imaging Technique



Harmonic Imaging

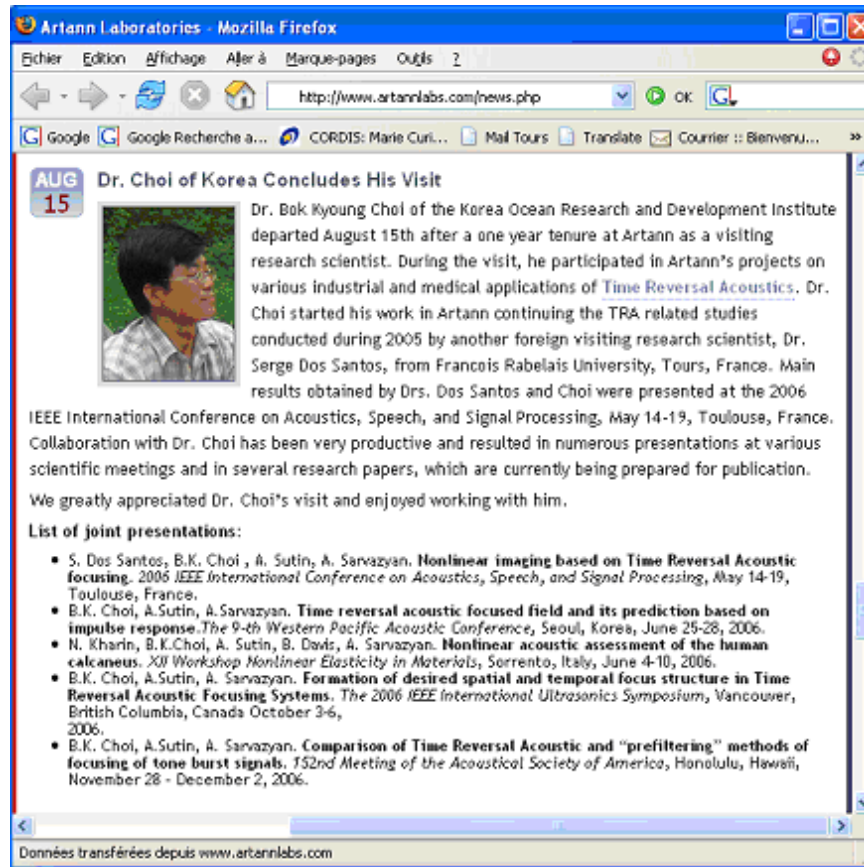


Traditional Amplitude C-scans (left side) and Harmonic Imaging (right side) of a CFRP sample after 0, 15000 and 17000 fatigue cycles (Christophe Mattei and Pierre Marry (CSM), Progress in QNDE, 2002)



## Collaboration avec ARTANN - TRA system

Information associée aux méthodes et aux systèmes TRA ( <http://www.artannlabs.com> ) développées au cours de la collaboration ( <http://www.artannlabs.com/partnerships.html> ) à Artann Laboratories en 2005 et dans le cadre du CRCT.



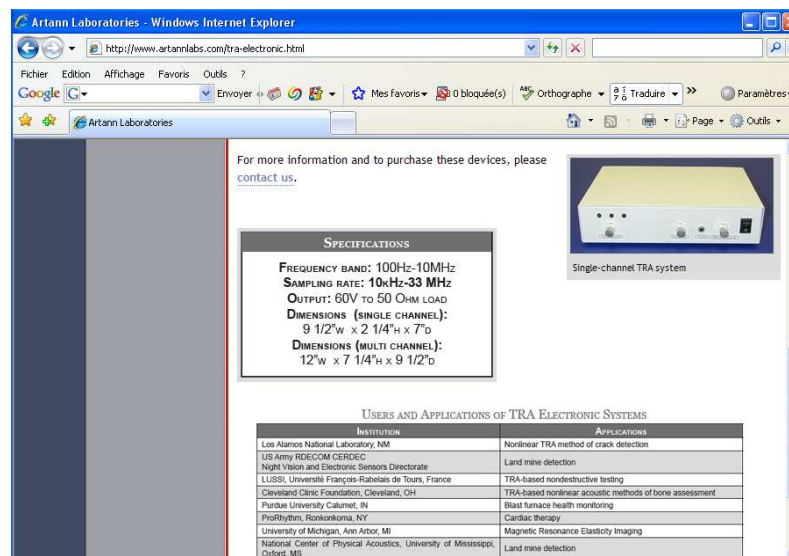
**AUG 15** **Dr. Choi of Korea Concludes His Visit**

Dr. Bok Kyoung Choi of the Korea Ocean Research and Development Institute departed August 15th after a one year tenure at Artann as a visiting research scientist. During the visit, he participated in Artann's projects on various industrial and medical applications of **Time Reversal Acoustics**. Dr. Choi started his work in Artann continuing the TRA related studies conducted during 2005 by another foreign visiting research scientist, Dr. Serge Dos Santos, from Francois Rabelais University, Tours, France. Main results obtained by Drs. Dos Santos and Choi were presented at the 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 14-19, Toulouse, France. Collaboration with Dr. Choi has been very productive and resulted in numerous presentations at various scientific meetings and in several research papers, which are currently being prepared for publication. We greatly appreciated Dr. Choi's visit and enjoyed working with him.

**List of joint presentations:**

- S. Dos Santos, B.K. Choi, A. Sutin, A. Sarvazyan. **Nonlinear imaging based on Time Reversal Acoustic focusing**. 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, May 14-19, Toulouse, France.
- B.K. Choi, A. Sutin, A. Sarvazyan. **Time reversal acoustic focused field and its prediction based on impulse response**. The 9-th Western Pacific Acoustic Conference, Seoul, Korea, June 25-28, 2006.
- N. Kharin, B.K. Choi, A. Sutin, B. Davis, A. Sarvazyan. **Nonlinear acoustic assessment of the human calcaneus**. XII Workshop Nonlinear Elasticity in Materials, Sorrento, Italy, June 4-10, 2006.
- B.K. Choi, A. Sutin, A. Sarvazyan. **Formation of desired spatial and temporal focus structure in Time Reversal Acoustic Focusing Systems**. The 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium, Vancouver, British Columbia, Canada October 3-6, 2006.
- B.K. Choi, A. Sutin, A. Sarvazyan. **Comparison of Time Reversal Acoustic and "prefiltering" methods of focusing of tone burst signals**. 152nd Meeting of the Acoustical Society of America, Honolulu, Hawaii, November 28 - December 2, 2006.

Données transférées depuis [www.artannlabs.com](http://www.artannlabs.com)



For more information and to purchase these devices, please [contact us](#).

**SPECIFICATIONS**

**FREQUENCY BAND:** 100Hz-10MHz  
**SAMPLING RATE:** 10kHz-33 MHz  
**OUTPUT:** 60V to 50 Ohm LOAD  
**DIMENSIONS (SINGLE CHANNEL):** 9 1/2" w x 2 1/4" h x 7" d  
**DIMENSIONS (MULTI CHANNEL):** 12" w x 7 1/4" h x 9 1/2" d

**Single-channel TRA system**

**USERS AND APPLICATIONS OF TRA ELECTRONIC SYSTEMS**

INSTITUTION	APPLICATIONS
Los Alamos National Laboratory, NM	Nonlinear TRA method of crack detection
US Army NITECOM CERDEC	Land mine detection
Night Vision and Electronic Sensors Directorate	TRA-based nondestructive testing
LUSSI, Université François-Rabelais de Tours, France	TRA-based nonlinear acoustic methods of bone assessment
Cleveland Clinic Foundation, Cleveland, OH	Blast trauma health monitoring
Purdue University Calumet, IN	Cardiac therapy
ProRhythm, Ronkonkoma, NY	Magnetic Resonance Elasticity Imaging
University of Michigan, Ann Arbor, MI	Land mine detection
National Center of Physical Acoustics, University of Mississippi, Oxford, MS	

# Index

- AERONEWS, 18, 20, 22, 24, 34, 73, 105, 134  
 Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne, 23  
 analyse des symétries, 116  
 analyse temps-fréquence, 20  
 approche temps-fréquence, 131  
 Artann Laboratories, 23, 24, 67, 78, 81, 160  
  
 balayage de fréquence, 24, 78  
 boucle d'hystérésis, 127  
  
 caractérisation de la fatigue, 54  
 caractérisation sub-lambda, 55, 104, 139  
 Caractérisation Ultrasonores de Matériaux, 29  
 cavité réverbérante, 133  
 CENS, 18  
 chip-coded excitation, 78  
 chirp-coded excitation, 68  
 chirp-coded TR-NEWS, 22  
 CND, 24, 35, 53, 55, 59–61, 64, 78, 79, 86, 139  
 coda, 80, 133  
 codage de sources, 78  
 codes pseudo-spectraux, 22, 138  
 coefficient non linéaire, 94  
 coefficient non linéaire  $\beta$ , 94, 100  
 comportement non linéaire non classique, 127  
 composite, 27, 31, 77, 138  
 composites, 25, 30  
 contrôle de santé des matériaux, 28  
 COPOL, 20, 22, 34, 131  
 CRCT, 3, 24  
  
 Dassault Aviation, 30  
 Drexel University, 24, 68  
  
 effet mémoire, 103  
 ERASMUS, 5, 7  
 espace de Preisach-Mayergoysz, 128  
 espace PM, 102, 127, 132  
 estimateurs statistiques, 23  
  
 fatigue, 19, 61, 127, 134  
 fatigue des matériaux, 56  
 fissure, 31, 55, 56, 65, 73, 74, 127, 131, 132, 141  
 FULLI-TRAIN, 71  
 FULLI-TRAINS, 18  
  
 instabilité modulationnelle, 21, 135, 141  
 interaction paramétrique, 135  
 invariance, 69, 85  
 invariance d'échelle, 90, 95  
 invariant, 88, 91, 93, 113–115, 118, 120, 126  
 inversion d'impulsion, 22, 23, 68, 69, 72, 73, 79, 107, 121, 125, 142  
 inversion d'impulsions ultrasonores, 123  
 IZFP, 27, 140  
  
 mesoscopique, 131, 139  
 mesure globale de nonlinéarité, 77  
 mesure locale de nonlinéarité, 77  
  
 micro-défauts, 19  
 milieux hystérétiques, 132  
 modulation de phase, 27, 61, 77, 100, 101, 137  
 modèle multi-échelle, 129  
 multi-échelles, 21, 78, 96, 111, 127, 131, 138, 139  
 mémoire, 134  
 méthode de diffusion inverse, 90  
 méthode pseudo-spectrale, 105  
 méthode pseudo-spectrales, 104  
 méthodes pseudo-spectrales, 19  
  
 nanosystème, 139  
 NDT Expert, 30  
 NEWS-TR, 19, 22, 24, 30, 70, 71, 105, 121, 137  
 NL-TRA, 23, 25, 67, 71  
 non-linéarité locale, 65  
 nonlinéarité classique, 128  
 nonlinéarité globale, 63  
 nonlinéarité hystérétique, 65, 101, 119  
 nonlinéarité locale, 69  
 nonlinéarité non classique, 95, 101, 107, 127  
 Nottingham University, 25–27, 77  
 NUCAM, 19, 22, 34, 57, 60  
  
 paramètre non linéaire  $\beta$ , 61, 85  
 principe de superposition, 114, 118, 120  
 Prix de l'Ingénieur de l'Année, 30  
 propriétés multi-échelles, 55  
 PSA Peugeot-Citroën, 34  
  
 retournement temporel, 66, 69, 134  
 rugosité d'une surface, 20, 23  
 réciprocité, 61, 66, 126  
  
 soliton, 21, 25, 92, 120, 135, 140  
 statistique d'ordre supérieur, 132  
 Stevens Institute, 24  
 Stevens Institute of Technology, 15, 26, 33  
 Stevens Institute of Technology, 35  
 sweep TR-NEWS, 79  
 sweep-TR-NEWS, 121  
 SYANTRA, 23, 35, 121  
 symétrie, 85, 97, 141, 151  
 symétries de Lie, 90, 112  
  
 Tallinn University, 25  
 temps-fréquence, 23  
 TR-NEWS, 19, 22, 24, 30, 70, 71, 79, 82, 105, 121, 133, 137  
  
 Université de Courtrai, 24, 73  
 Université de Nottingham, 18, 24  
  
 ZD Rpety - DAKEL, 30  
  
 émission acoustique, 79  
 équation de Burgers, 90, 118  
 équation de diffusion, 114  
 équation de Langevin stochastique, 92  
 étalonnage, 61, 75, 82





# Bibliographie

- [1] S. I. AANONSEN – « Numerical computation of the nearfield of a finite amplitude sound beam », Tech. report, Rapport 73 de l'université de Bergen, 1983. 2.5
- [2] M. B. ABD-EL-MALEK & S. M. A. EL-MANSI – « Group theoretical methods applied to burgers' equation », *Journal of Computational and Applied Mathematics* **115** (2000), no. 1-2, p. 1–12. 3.2, 3.3.3, 3.3.3
- [3] M. J. ABLOWITZ & P. A. CLARKSON – *Solitons, nonlinear evolution equations and inverse scattering*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991. 2.4
- [4] M. J. ABLOWITZ, D. J. KAUP, A. C. NEWELL & H. SEGUR – « The inverse scattering transform-fourier analysis for nonlinear problems study », *Appl. Phys.* **53** (1974), p. 249. 2.4
- [5] W. F. AMES – *Nonlinear partial differential equations in engineering ii*, Academic Press, New York, 1972. 3.3.3
- [6] R. L. ANDERSON & N. H. IBRAGIMOV – *Lie-backlund transformations in applications*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 1979. 3.2
- [7] M. A. AVERKIOU & R. O. CLEVELAND – « Modeling of an electrohydraulic lithotripter with the kzk equation », *J. Acoust. Soc. Amer.* **106** (1999), no. 1, p. 102–112. 2.5.1
- [8] C. BARRIERE & D. ROYER – « Diffraction effects in the parametric interaction of acoustical waves : application to measurements of the nonlinearity parameter  $b/a$  in liquids », *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* **48** (2001), no. 6, p. 1706–1715. 1.4.3
- [9] R. T. BEYER – *Nonlinear acoustics*, Acoustical Society of America, 1974. 2.4
- [10] D. T. BLACKSTOCK – « Nonlinear acoustics », ch. Progressive waves in lossless and lossy fluids, p. 65–150, Academic, New York, 1998. 2.5
- [11] P. BLANC-BENON, B. LIPKENS, L. DALLOIS, M. F. HAMILTON & D. T. BLACKSTOCK – « Propagation of finite amplitude sound through turbulence : Modeling with geometrical acoustics and the parabolic approximation », *J. Acoust. Soc. Amer.* **111** (2002), no. 1, p. 487–498. 2.5.1
- [12] G. W. BLUMAN & J. D. COLE – *Similarity methods for differential equations*, Springer-Verlag, Berlin New York, 1974. 2.4, 3.2

- [13] O. BOU MATAR – « Applications de l'acoustique non linéaire à l'imagerie médicale et au contrôle non destructif de matériaux », Habilitation à diriger des recherches, Université François Rabelais - Tours, Dec 2003. 1.1
- [14] O. BOU MATAR, S. CALLÉ, T. GOURSOLLE & S. DOS SANTOS – « 3d simulations of nonlinearity based time reversal imaging of damaged materials », in *proc of the International Congress on Ultrasonics*, 2007. 2.6.2, 3.5.4
- [15] O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, S. CALLÉ, T. GOURSOLLE, S. VANAVERBEKE & K. VAN DEN ABEELE – « Simulations of nonlinearity based time reversal imaging of damaged materials », in *Proc of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing* (Berlin), 2006. 1, 2.6.2
- [16] O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, L. HAUMESSER & F. VANDER MEULEN – « Phase modulation in nonlinear elastic medium », in *9th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials (9th IWNEM)*, Karlskrona, Sweden, May 31- June 4, 2004. 1.4.5, 2.6
- [17] O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, M. VILA & F. VANDER MEULEN – « Acoustic nonlinear parameter measurement in solid with a contact phase modulation method », in *proc of the 2002 IEEE Ultrasonic Symposium*, Oct 8-11 2002, p. 881–884. 1.4.3, 4
- [18] O. BOU MATAR, V. PREOBRAZHENSKY & P. PERNOD – « Two-dimensional axisymmetric numerical simulation of supercritical phase conjugation of ultrasound in active solid media », *J.Acoust.Soc.Am* **118** (2005), no. 5, p. 2880–2890. 2.6.2
- [19] O. BOU MATAR, C. ROSSIGNOL, L. PIZARRO, S. DOS SANTOS & F. PATAT – « Mapping of airborne ultrasonic fields using optical heterodyne probing and tomography reconstruction », in *proc. of the 2000 IEEE Ultrasonic Symposium* (Caribe Hilton, San Juan, Puerto Rico), Oct 22-25 2000. 3.5.5
- [20] O. BOU MATAR, T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS & S. CALLÉ – « 2d and 3d pseudo spectral time domain simulations of elastic waves propagation in nonlinear hysteretic heterogeneous solids : applications to time reversal imaging of damaged materials », in *proc of the 19<sup>th</sup> International Congress on Acoustics* (Madrid, Spain), 2007, invited paper. 32, 2.6.2
- [21] O. BOU MATAR, M. VILA, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER. J. FORTINEAU, T. GOURSOLLE & S. DOS SANTOS – « Nonlinear parameter measurement for nondestructive evaluation of solids : Calibrated phase modulation method », in *proc. of the 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA17* (Pennsylvania State University, USA), 18-21 July 2005. 1.5.2, 1.5.2
- [22] V. BOYKO – « On new generalizations of the burgers and korteweg-de vries equations », *Symmetry in Nonlinear Mathematical Physics* **1** (1997), p. 122–129. 3.3.3
- [23] M. BREAZEALE & I. OSTROVSKII – « Fundamental and nonclassical nonlinearity in crystals », *Innovation in nonlinear acoustics : ISNA17 - 17th International Symposium on Nonlinear Acoustics including the International Sonic Boom Forum* **838** (2005), p. 11–18. 2.5

- 
- [24] J. M. BURGERS – *A mathematical model illustrating the theory of turbulence*, Academic Press, New York, 1948. 3.3.3
  - [25] B. J. CANTWELL – « Introduction to symmetry analysis », Cambridge University Press, 2002. 3.2, 3.2.1
  - [26] E. CARTENSEN – « Self-reciprocity calibration of electroacoustic transducers », *J. Acoust. Soc. Am.* **19** (1947), no. 6, p. 961–965. 1.4.4
  - [27] J. COLE – « On a quasi-linear parabolic equation occurring in aerodynamics », *Quart. Appl. Math.* **9** (1951), p. 225–236. 3.3.3
  - [28] I. J. COLLISON – « Measurement of material nonlinearity using laser ultrasound », Thèse, University of Nottingham, Dec 2008. 1.7
  - [29] C. R. COURTNEY, B. W. DRINKWATER, S. A. NEILD & P. D. WILCOX – « Factors affecting the ultrasonic intermodulation crack detection technique using bispectral analysis », *NDT & E International* **41** (2008), p. 223–234. 2.3
  - [30] F. DAGRAU, F. COULOUVRAT, R. MARCHIANO & N. HÉRON – « Non linear shock wave propagation in heterogeneous fluids : a numerical approach beyond the parabolic approximation with application to sonic boom », in *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA* (Stockholm, Sweden), ISBN : 978-0-7354-0544-8, American Institute of Physics, 2008, p. 389–392. 2.5.1
  - [31] Y. DECANINI, A. FOLACCI, P. GABRIELLI & J.-L. ROSSI – « algebraic aspects of multiple scattering by two parallel cylinders : classification and physical interpretation of scattering resonances », *Journal of Sound and Vibration* **221** (1999), no. 5, p. 785–804. 3.2
  - [32] J. DELLINGER, D. VASICEK & C. SONDERGELD – « Kelvin notation for stabilizing elastic-constant inversion », *Revue de l'Institut Française du Pétrole* **53** (1998), p. 709–719. 2.6.2
  - [33] P. DELSANTO & S. HIRSEKORN – « A unified treatment of nonclassical nonlinear effects in the propagation of ultrasound in heterogeneous media », *Ultrasonics* **42** (2004), p. 1005–1010. 3.5.1
  - [34] S. DOS SANTOS – *Instabilité modulationnelle dans les systèmes discrets non linéaires de dimension finie*, Mémoire, Université de Dijon, 1995. 65
  - [35] S. DOS SANTOS – « Synchronisation d'oscillateurs dans une boucle électronique », exposé dans le cadre du groupe "Interaction Homme-Temps" de l'Université de Franche-Comté, mai 1998. 4.3
  - [36] — , « Acoustique non linéaire et instrumentation pour la caractérisation ultrasonore des matériaux micro-inhomogènes », séminaire à l'Institut FEMTO, Besançon, 29 avril 2004. 61
  - [37] — , « Méthodes algébriques pour un traitement du signal adapté à l'acoustique non linéaire : application au contrôle non destructif en aéronautique », séminaire invité au Laboratoire de Mathématique et Physique Théorique de l'Université de Tours, 25 Novembre 2004. 3.5.1
  - [38] — , « Symmetry of nonlinear acoustics equations using group theoretic methods : a signal processing tool for extracting judicious physical variables », in *proc. of the Joint SFA-DAGA meeting* (Strasbourg), 2004, p. 549. 3.3, 3.3.3

- [39] — , « Caractérisation non linéaire des matériaux dégradés : Modélisation des non-linéarités "non classiques" (PM-space), traitement du système par "analyse des symétries", et expérimentation ultrasonore par retournement temporel », séminaire au Laboratoire Ultrasons Signaux et Instrumentation (LUSSI CNRS), Université de Tours, 18 mai 2005. 13, 37, 47, 62
- [40] — , « Contact pulse-echo method for nonlinearity measurements of solids via phase modulation method : Calibration, limitation and future trends », séminaire invité à School of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham, 19 sept 2005. 3.5.5
- [41] S. DOS SANTOS, B. CHOI, A. SUTIN & A. SARVAZYAN – « Nonlinear imaging based on time reversal acoustic focusing », in *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique* (Tours), 2006, p. 359–362. 1.5.1, 16
- [42] S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE, M. DRÁB & T. SLUNEČKO – « Chirp-coded excitation applied with advanced pulse inversion for nonlinear acoustics in complex steel samples », in *joint international ASA-EEA-SFA symposium ACOUSTICS'08, Paris, july 2008 ; abstract in Acta Acustica*, 94, Suppl. 1, p. 431., 2008. 27
- [43] S. DOS SANTOS, V. GUSEV, L. HAUMESSER, F. VANDER MEULEN & O. BOU MATAR – « Optimized excitation sources and velocity exact solutions for ultrasonic field propagation in a nonlinear medium with hysteretic behavior », in *Proc. of IEEE UFFC 50th Anniversary Joint Conference* (Montréal, Canada), 2004. 3.3.3, 4.3.2
- [44] S. DOS SANTOS, P.-Y. LE BAS, K. VAN DEN ABEELE, T. GOURSOLLE, O. BOU MATAR & M. DOMENJOUR – « Tr-news and news-tr experiments for an imaging of the local nonlinearity in damaged aeronautic complex structure », in *Int. Congress on Acoustics, Madrid, Spain, 2-7 September*, 2007. 1.5.2
- [45] S. DOS SANTOS, P. MARÉCHAL, J.-M. GIRAULT & F. VANDER MEULEN – « Advances in signal processing for non destructive evaluation of materials », ch. Characterization of a Moving Surface Roughness by Backscatterer Ultrasound Performed with Time-Frequency Analysis and High Order Statistics, p. 149–154, AIP, 2002. 3.5.2
- [46] S. DOS SANTOS, P. MARÉCHAL, F. VANDER MEULEN & M. LETHIECQ – « Review of quantitative nondestructive evaluation », vol. 21, ch. Time-Frequency Analysis For Surface Roughness Characterization Using Backscatter Ultrasound, p. 752–758, AIP, 2002. 3.5.2
- [47] S. DOS SANTOS & C. PLAG – « Analyse des symétries des systèmes non linéaires : simplification des équations de propagation ; traitement du signal et méthode d'inversion de pulse à l'ordre 3 », in *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique* (Tours), 2006, p. 455–458. 3.3.2
- [48] S. DOS SANTOS, A. SUTIN, D. HORBATT & A. SARVAZYAN – « Nonlinear time reversal acoustics, report of collaboration (part 2) », Tech. report, LUSSI-CNRS University of Tours - Stevens Institute of Technology - Artann Laboratories, 18 oct. 2005. 1.5

- 
- [49] S. DOS SANTOS, A. SUTIN & A. SARVAZYAN – « Evaluation of local nonlinearity using time reversal acoustic focusing », in *joint international ASA-EEA-SFA symposium ACOUSTICS'08, Paris, july 2008 ; abstract in Acta Acustica*, 94, Suppl. 1, p. 867., 2008. 1.5, 1.7.3
  - [50] S. DOS SANTOS, F. TESTON, O. BOU MATAR, F. VANDER MEULEN, E. GOUIN & M. LETHIECQ – « Thermosetting smc resin characterization using linear and nonlinear ultrasonics », in *AIP Conference Proceedings*, vol. 557, 2000, p. 1248–1252. 1.4.1
  - [51] S. DOS SANTOS & C. PLAG – « Symmetry analysis : a way to find how to excite and analyze a complex system. applications for imaging the elastic nonlinear behavior of solids », in *11th International Workshop on Nonlinear Elasticity in Materials (11th IWNEP)*, Sorrento, Italy, June, 2006. 4.3.2
  - [52] —, « Excitation symmetry analysis method (esam) for calculation of higher order nonlinearities », *International Journal of Non-Linear Mechanics* 43 (2008), p. 164–169. 3.3, 3.4.2
  - [53] S. DOS SANTOS, M. VILA, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER & O. BOU MATAR – « Application de l'acoustique non linéaire dans le contrôle non destructif : mesure du paramètre non linéaire de la silice par une méthode de modulation de phase », in *actes de la 6ème Rencontre du Non-Linéaire* (Institut H. Poincaré, Paris), 2003, p. 107–112. 1.4.3
  - [54] C. DROST & G. MILANOWSKI – « Self-reciprocity calibration of arbitrary terminated ultrasonic transducers », *IEEE Trans. Sonics & Ultrason.* 27 (1980), no. 2, p. 65–71. 1.4.4
  - [55] C. FLYTZANIS – « Merging nonlinear acoustics and optics : Light driven large amplitude short acoustic pulses and breakdown in dielectrics », in *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA* (Stockholm, Sweden), American Institute of Physics, 2008, p. 471–480. 3.3.3, 3.5.5
  - [56] B. FORNBERG – « The pseudospectral method : comparison with finite differences for the elastic wave equation », *Geophysics* 52 (1987), p. 483–501. 2.6.1
  - [57] J. FORTINEAU, F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER, S. DOS SANTOS, , O. BOU MATAR & G. FEUILLARD – « étude ultrasonore de la reprise hydrique dans des résines phénoliques par des mesures linéaires et non linéaires », in *12ème Journées d'Acoustique Physique Sous-Marine et Ultrasonores*, Aix, Mai, 2005. 1.4.5
  - [58] W. I. FUSHCHICH, W. M. SHTELEN & N. I. SEROV – *Symmetry analysis and exact solutions of equations of nonlinear mathematical physics*, Kluwer Academic Pub., The Netherlands, 1989. 3.3.3
  - [59] D. GOTTLIEB & S. ORSZAG – « Numerical analysis of spectral methods. theory and applications », *Soc. Industr. Appl. Math.* (1977). 2.6.1
  - [60] T. GOURSOLLE – « Propriétés acoustiques non linéaires classiques et non classiques : Applications au contrôle de santé des matériaux de l'industrie aéronautique », Thèse, Université François Rabelais-Tours, 2007. 3.5.1



- [61] T. GOURSOLLE, S. CALLÉ, O. BOU MATAR & S. DOS SANTOS – « Nonlinear time reversal acoustics for defect localization : numerical study of retrofocusing properties », in *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium* (Vancouver), October 2006, p. 317–320. 2.6.2
- [62] — , « Amplitude dependence of the parametric interaction components inside the retrofocusing area with nonlinear time reversal acoustics », in *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA* (Stockholm, Sweden), ISBN : 978-0-7354-0544-8, 2008, p. 521–524. 2.6.2
- [63] T. GOURSOLLE, S. CALLÉ, S. DOS SANTOS & O. BOU MATAR – « A two dimensional pseudospectral model for time reversal (TR) and nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) », *J. Acoust. Soc. Am.* **122** (2007), no. 6, p. 3220–3229. 1.5.2, 2.6.2
- [64] T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, S. CALLÉ & O. BOU MATAR – « 3d pstd simulations of news-tr and tr-news methods : Application to nonclassical nonlinearity ultrasonic imaging », in *proc. of the IEEE Ultrasonic Symposium*, 2007. 2.6.2
- [65] T. GOURSOLLE, S. DOS SANTOS, F. VANDER MEULEN & L. HAUMESSER – « Contact phase modulation measurements in bilayer solids using nonlinear means », in *abstract in NDT Welding Bulletin*, Vol. 2, p. 14, 2005. 12
- [66] T. GOURSOLLE, J. FORTINEAU, S. CALLÉ & S. DOS SANTOS – « Localized ultrasonic parametric interaction near cracked area in thin samples with nonlinear elastic wave spectroscopy-based time reversal », in *Proceedings of International Congress of Ultrasonics* (Vienna), 2007. 2.6.2
- [67] R. A. GUYER, K. P. MCCALL & G. N. BOITNOTT – « Hysteresis, discrete memory, and nonlinear wave propagation in rock : A new paradigm », *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995), p. 3491–3494. 2.5.2
- [68] R. GUYER & P. JOHNSON – « Nonlinear mesoscopic elasticity : evidence for a new class of materials », *Physics Today* (1999), p. 30–36. 3.5.1
- [69] M. F. HAMILTON, J. N. TJOTTA & S. TJOTTA – « Nonlinear effects in the farfield of a directive sound source », *J. Acoust. Soc. Am.* **78** (1985), p. 202–216. 2.5.1
- [70] M. F. HAMILTON, V. A. KHOKHLOVA & O. V. RUDENKO – « Analytical method for describing the paraxial region of finite amplitude sound beams », *J. Acoust. Soc. Am.* **101** (1997), no. 3, p. 1298–1308. 2.5.1
- [71] L. HAUMESSER, O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS & F. VANDER MEULEN – « Transmission through and reflection from a fluid elastic layer : quasi-linear approximation », in *1st joint workshop of Russian Acoustical Society (RAS) and French Acoustical Society (SFA) on high intensity acoustic waves in modern technological and medical applications*, see announcement in *J. Acoust. Soc. Am.* **119** (2), p 678, 2006), , ISBN 5-89118-383-8, pp 75-80 (2005), 2005, invited paper. 1.4.2
- [72] L. HAUMESSER, J. FORTINEAU, D. PARENTHOINE, S. DOS SANTOS, , T. GOURSOLLE & F. VANDER MEULEN – « Ultrasonic nonlinear parameter measurement - critical investigation of experimental devices », in *2nd journées du GDR Onde*, Anglet, 2-6 juin, 2008. 1.8

- 
- [73] L. HAUMESSER, F. VANDER MEULEN, , P. MARÉCHAL, S. DOS SANTOS & O. BOU MATAR – « Etude théorique et expérimentale de la génération du deuxième harmonique à travers une plaque immergée », in *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique* (Tours), 2006, p. 509–512. [4](#)
  - [74] J. M. HILL – *Solution of differential equations by means of one-parameter groups*, Pitman, Boston, 1982. [3.2](#)
  - [75] E. HOPF – « The partial differential equation  $ut+uux= uxx$  », *Comm. Pure Appl. Math.* **3** (1950), p. 201–230. [3.3.3](#)
  - [76] N. H. IBRAGIMOV – *Transformation groups applied to mathematical physics*, Reidel, Dordrecht, the Netherlands, 1985. [3.2](#)
  - [77] N. H. IBRAGIMOV – *Handbook of lie group analysis of differential equations, vol. 1, symmetries, exact solutions and conservation laws*, CRC Press, Boca Raton, 1994. [3.2](#), [3.3.3](#)
  - [78] R. K. ING & M. FINK – « Time reversed lamb waves  $\check{T}$ , *ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* », *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **45** (1998), p. 1032–1043. [1.5](#)
  - [79] — , « Ultrasonic imaging using spatio-temporal matched field (stmf) processing  $\check{U}$  applications to liquid and solid waveguides », *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **48** (2001), p. 374–386. [1.5](#)
  - [80] G. KINO – *Acoustic waves : Devices, imaging, and analog signal processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987. [1.4.4](#), [1.4.4](#)
  - [81] R. KUC – « Ultrasonic tissue characterization using kurtosis », *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.* **33** (1986), no. 3, p. 273–279. [3.5.2](#)
  - [82] A. G. KUDRYAVTSEV & O. A. SAPOZHNIKOV – « Symmetries of the generalized khokhlov-zabolotskaya equation », *Acoustical Physics* **44** (1998), no. 5, p. 541–546. [2.5.1](#)
  - [83] A. KULIKOVSKII & E. SVESHNIKOVA – « Nonlinear waves in elastic media », CRC Press, 1995. [2.4](#)
  - [84] V. KUZNETSOV – « Equations of nonlinear acoustics », *Sov. Phys. Acoust.* **16** (1970), p. 467–470. [2.5.1](#)
  - [85] Y. LAPIDUS & O.V.RUDENKO – « An exact solution of the khokhlov-zabolotskaya equation », *Sov. Phys. Acoust.* **38** (1992), no. 2, p. 197. [2.5.1](#)
  - [86] P.-Y. LE BAS, K. VAN DEN ABEELE, S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE & O. BOU MATAR – « Experimental analysis for nonlinear time reversal imaging of damaged materials », in *Proc of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing* (Berlin), 2006. [1](#), [1.5.2](#), [2.6.2](#)
  - [87] Y. LEE & M. F. HAMILTON – « Time-domain modeling of pulsed finite-amplitude sound beams », *J. Acoust. Soc. Am.* **97** (1995), no. 2, p. 906–917. [2.4](#)
  - [88] Y. N. MAKOV – « Universal automodelling solution to the khokhlov-zabolotskaya equation for waves with shock fronts », *Acoustical Physics* **43** (1997), p. 722–727. [3.3.3](#)



- [89] P. MARQUIÉ, J.-M. BILBAULT, B. MICHAUX & S. DOS SANTOS – « Modulational instability in discrete systems », in *Conference on Nonlinear Coherent Structures in Physics and Biology* (Heriot-Watt University, Edinburgh), 1995. 4.3.1
- [90] —, « Modulational instability in real discrete systems », in *Proceedings of the Euroconference : Nonlinear Klein-Gordon and Schrödinger Systems, Theory and Applications* (San Lorenzo de Escorial (Madrid), Spain) (W. Scientific, éd.), 1995. 4.3.1
- [91] I. MAYERGOYSZ – « Hysteresis models from the mathematical and control theory points of view », *J. Appl. Phys.* **57** (1985), p. 3803–3805. 3.5.1
- [92] I. D. MAYERGOYZ – « Hysteretic models from the mathematical and control theory point of view », *J. Appl. Phys.* **57** (1985), p. 3803–3805. 2.5.2
- [93] K. R. MCCALL & R. A. GUYER – « Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials », *J. Geophys. Res.* **99** (1994), p. 23887–23897. 2.5.2
- [94] K. MCCALL & R. GUYER – « Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials », *Journal of Geophysical research* **99** (1994), no. B12, p. 23887–23897. 3.5.1
- [95] M. MORAN & R. GAGGIOLI – « Reduction of the number of variables in systems of partial differential equations with auxiliary conditions », *SIAM J. Appl. Math.* **16** (1968), p. 202–215. 3.2.1, 3.2.2, 3.3.3, 3.3.3
- [96] P. J. OLVER – *Applications of lie groups to differential equations*, Springer, Berlin, 1986. 3.2
- [97] F. PREISACH – « Über die magnetische nachwirkung », *Z. Phys.* **94** (1935), p. 277–302. 2.5.2, 3.5.1
- [98] A. PUCKETT & M. L. PETERSON – « Review of progress of quantitative nondestructive evaluation », vol. 21, ch. Fidelity of an analytical time reversal mirror, p. 945–952, American Institute of Physics, New York, 2002. 1.5, 13
- [99] —, « A semi-analytical model for predicting multiple propagating axially symmetric modes in cylindrical waveguides », *Ultrasonics* **43** (2005), p. 197–207. 1.5
- [100] O. V. RUDENKO & S. I. SOLUYAN – *Theoretical foundations of nonlinear acoustics*, Consultants Bureau, New York, 1977. 2.5.2
- [101] M. SCALERANDI, A. S. GLIOZZI, C. L. E. BRUNO, D. MASERA & P. BOCCA – « A scaling method to enhance detection of a nonlinear elastic response », *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008), p. 101912–101914. 1.7.3
- [102] F. SCHWARZ – « Symmetries of differential equations ; from sophus lie to computer algebra. », *SIAM Review* **30** (1988), p. 450–481. 3.3
- [103] W. M. SHTELEN – « On group method of linearization of burgers' equation. », *Math. Phys. Nonlinear Mech. (Kiev)* **11** (1989), no. 54, p. 89–91. 3.3.3
- [104] C. SOPHOCLEOUS – « Transformation properties of a variable-coefficient burgers equation », *Chaos, Solitons and Fractals* **20** (2004), no. 5, p. 1047–1057. 2.4, 3.2
- [105] A. M. SUTIN, J. A. TENCATE & P. A. JOHNSON – « Single-channel time reversal in elastic solids », *The Journal of the Acoustical Society of America* **116** (2004), no. 5, p. 2779–2784. 1.5

- 
- [106] J. TAVAKKOLI, D. CATHIGNOL, R. SOUCHON & O. A. SAPOZHNIKOV – « Modeling of pulsed finite amplitude focused sound beams in time domain », *J. Acoust. Soc. Am.* **104** (1998), p. 2061–2072. 2.6.1
  - [107] O. BOU MATAR, S. DOS SANTOS, J. FORTINEAU, T. GOURSOLLE, L. HAUMESSER & F. VANDER MEULEN. – « Pseudo spectral simulations of elastic waves propagation in heterogeneous nonlinear hysteretic medium », in *proc of the 17th ISNA, State College, USA*, 2005, p. 95–98. 2.3, 2.6, 2.6.2
  - [108] V. GUSEV – « Propagation of acoustic pulses in material with hysteretic nonlinearity », *J. Acoust. Soc. Am.* **107** (2000), no. 6, p. 3047–3058. 2.5.2, 2.5.2, 3.3.3, 3.3.3
  - [109] — , « Theory of non-collinear interactions of acoustic waves in an isotropic material with hysteretic quadratic nonlinearity », *The Journal of the Acoustical Society of America* **111** (2002), no. 1, p. 80–94, Intercal :Hysteresis. 3.5.1
  - [110] N. H. IBRAGIMOV & O. V. RUDENKO – « Principle of an a priori use of symmetries in the theory of nonlinear waves », *Acoustical Physics* **50** (2004), p. 406–419. 3.2, 3.3.3
  - [111] A. M. LOMONOSOV, V. V. KOZHUSHKO & P. HESS – « Laser-based nonlinear surface acoustic waves : From solitary to bond-breaking shock waves », in *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA* (Stockholm, Sweden), American Institute of Physics, 2008, p. 481–490. 3.3.3, 62
  - [112] A. O. MAKSIMOV – « Symmetry in bubble dynamics », *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **9** (2004), no. 1, p. 83–92. 4.3.1
  - [113] I. MAYERGOYZ – « Mathematical models of hysteresis and their applications », Elsevier, 2003. 3.5.1
  - [114] I. A. MOLOTKOV – « Variational and analytical methods in nonlinear acoustics », in *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA* (Stockholm, Sweden), ISBN : 978-0-7354-0544-8, American Institute of Physics, 2008, p. 62–64. 3.3.3
  - [115] P. B. NAGY – « Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization », *Ultrasonics* **36** (1998), p. 375–381. 1.2.1, 1.4.1, 1.4.3
  - [116] P. OLIVIER, P. MARGUERÈS & P. ORTEU – « Revue des composites et des matériaux avancés », vol. 17, Lavoisier, 2007. 4.2.1
  - [117] L. A. OSTROVSKY & O. V. RUDENKO – « What problems in nonlinear acoustics seem to be important and interesting today ? », in *proc. of the 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics ISNA* (Stockholm, Sweden), ISBN : 978-0-7354-0544-8, American Institute of Physics, 2008, p. 9–16. 1.5.1, 1.5.3, 3.3.3
  - [118] M. H. PEDERSEN, T. MISARIDIS & J. JENSEN – « Clinical evaluation of chirp-coded excitation in medical ultrasound », *Ultras. in Med. & Biol.* **29** (2003), p. 895–905. 1.5.1, 1.7.3
  - [119] Z. PREVOROVSKY & S. DOS SANTOS – « Nonlinear ultrasonic spectroscopy used to crack detection in aircraft wing panel », in *Proc of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing and in NDT Welding Bulletin*, (P. Mazal, éd.), no. ISSN 1213-3825, 2006, p. 25–32. 2.6.2

- [120] N. QUIEFFIN – « étude du rayonnement acoustique de structures solides : vers un système d'imagerie haute résolution », Thèse, Université Paris 6 - Pierre et Marie Curie, Dec 2004. 1.5, 3.5.4
- [121] N. QUIEFFIN, S. CATHELINE, R. K. ING & M. FINK – « 2d pseudo-array using an ultrasonic one channel time-reversal mirror », in *in proc. of the IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr. Symposium* (Montréal), 2004. 1.5
- [122] — , « Real-time focusing using an ultrasonic one channel time-reversal mirror coupled to a solid cavity », *J. Acoust. Soc. Am.* **115** (2004), p. 1955–1960. 1.5
- [123] N. QUIEFFIN, R. K. ING, S. CATHELINE & M. FINK – « Real time focusing using an ultrasonic "one channel time-reversal mirror" coupled to a solid structure », *J. Acoust. Soc. Am.* **112** (2002), p. 2414. 1.5, 13
- [124] H. RISKEN – « The fokker-Planck equation : Methods of solutions and applications », Springer Series in Synergetics, 1989. 2.4
- [125] T. D. ROSSING – « Handbook of acoustics », Springer, 2007. 2.4
- [126] P. ROUX, B. ROMAN & M. FINK – « Time-reversal in an ultrasonic waveguide », *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997), p. 1811–1813. 1.5
- [127] A. SUTIN, P. JOHNSON & J. TEN CATE – « Development of Nonlinear Time Reversed Acoustics (NLTRA) for Applications to Crack Detection in Solids », in *Proc. of the World Congress of Ultrasonics*, 2003, p. 121. 1.5
- [128] T. J. ULRICH, P. A. JOHNSON & R. A. GUYER – « Interaction dynamics of elastic waves with a complex nonlinear scatterer through the use of a time reversal mirror », *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007), p. 104301–104304. 1.5.2, 1.5.2, 26
- [129] K. E.-A. VAN DEN ABEELE & P. JOHNSON – « Elastic pulsed wave propagation in media with second- or higher-order nonlinearity. part ii. simulation of experimental measurements on berea sandstone », *The Journal of the Acoustical Society of America* **99** (1996), no. 6, p. 3346–3352, Intercal :Simulation. 3.5.1, 3.5.1
- [130] K. E.-A. VAN DEN ABEELE – « Elastic pulsed wave propagation in media with second- or higher-order nonlinearity. part i. theoretical framework », *The Journal of the Acoustical Society of America* **99** (1996), no. 6, p. 3334–3345. 3.5.1, 3.5.1
- [131] J. N. TJOTTA – « A class of exact solutions of the khokhlov-zabolotskaya equation », *Acoust. Phys.* **39** (1993), no. 5, p. 507–508. 2.5.1
- [132] K. VAN DEN ABEELE & S. DOS SANTOS – « Détection et localisation de micro-dégradation de matériaux par spectroscopie d'ondes élastiques non linéaires », *Acoustique et Technique* **45** (2006), p. 17–27. 1.5.2, 1.5.2, 2.6.2
- [133] K.-A. VAN DEN ABEELE, F. SCHUBERT, V. ALESHIN, F. WINDELS & J. CARME-LIET – « Resonant bar simulations in media with localized damage », *Ultrasonics* **42** (2004), p. 1017–1024. 3.5.1, 3.5.1
- [134] F. VANDER MEULEN, L. HAUMESSER, S. DOS SANTOS, T. GOURSOLLE, J. FORTINEAU & L. TRAN-HUU-HUE – « Méthode expérimentale de caractérisation des non-linéarités d'un transducteur ultrasonore », in *proc. of the 8ème Congrès Français d'Acoustique* (Tours), 2006, p. 505–508. 4

- 
- [135] M. VILA – « Caractérisation ultrasonore de matériau à l’aide de méthodes d’acoustique non linéaire », Thèse, Université François Rabelais-Tours, 2004. [1.4.4](#)
- [136] M. VILA, F. VANDER MEULEN, S. DOS SANTOS, L. HAUMESSER & O. BOU MATAR – « Contact phase modulation method for acoustic nonlinear parameter measurement in solid », *Ultrasonics* **42** (2004), no. 1-9, p. 1061–1065. [1.4.3](#), [1.4.4](#)
- [137] J. M. WEISS, M. TABOR & G. CARNEVALE – « The painlevé property of partial differential equations », *J. Math. Phys.* **24** (1983), no. 3, p. 522–526. [3.3.3](#)
- [138] P. WESTERVELT – « Parametric acoustic array », *The Journal of the Acoustical Society of America* **35** (1963), no. 4, p. 535–537. [2.5.1](#)
- [139] G. WITHAM – *Linear and nonlinear waves*, Wiley, New York, 1974. [3.2.1](#)
- [140] E. ZABOLOTSKAYA – « Sound beams in a nonlinear isotropic solid », *Sov. Phys. Acoust.* **32** (1986), p. 296–299. [2.5.1](#)
- [141] E. ZABOLOTSKAYA & R. KHOKLOV – « Quasi-plane waves in the nonlinear acoustics of confined beams », *Sov. Phys. Acoust.* **15** (1969), p. 35–40. [2.5.1](#)
- [142] V. Y. ZAITSEV – « A model of anomalous elastic nonlinearity of microinhomogeneous media », *Acoustic Letters* **19 (9)**, (1996), p. 171–174. [2.5](#)
- [143] V. ZAITSEV & V. NAZAROV – « On the frequency-independent acoustic q-factor of microinhomogeneous solids », *Acoustics Letters* **21** (1997), no. 1, p. 11–15. [2.5](#)
- [144] D. ZHANG, X.-F. GONG & B. ZHANG – « Second harmonic sound field after insertion of a biological tissue sample », *J. Acoust. Soc. Amer.* **111** (2002), no. 1, p. 45–48. [2.5.1](#)
- [145] V. ZVEREV & A. KALACHEV – « Modulation of sound by sound in the intersection of sound waves », *Sov. Phys. Acoust.* **16 n. 2** (1969), p. 204–208. [2.5.2](#)

---

---

## Résumé

Les travaux présentés synthétisent l'activité de Recherche réalisée, depuis 1998, au Laboratoire Ultrasons Signaux et Instrumentation FRE2448 CNRS de l'Université François-Rabelais. Cette recherche expérimentale et théorique vise, en vue d'une imagerie sub-lambda, à exploiter le cadre de l'acoustique non linéaire ultrasonore pour progresser dans l'instrumentation électronique et dans la modélisation acoustique de l'analyse, de l'évaluation et du contrôle non destructif (END/CND) de milieux complexes dégradés ou fissurés issus de l'industrie aéronautique. La modélisation mécanique multi-échelles des matériaux dégradés est implémentée via l'introduction de lois de comportement non linéaires non classiques (approche hystérétique phénoménologique de type Preisach-Mayergoyz) et est étendue au cas 3D par le formalisme de Kelvin. Une analyse des symétries des équations générales de propagation acoustique (Burgers, KZ, équation hystérétique), utilisant le formalisme des groupes de Lie, a permis de mettre en place les bases d'une analyse systémique exploitant les invariants extraits, entre autres, à partir des conditions a priori d'excitation. Les propriétés d'invariance par retournement temporel et par réciprocité constituent l'ossature des techniques de localisation des nonlinéarités dans les milieux complexes. Un traitement du signal automatisé et synchronisé permet cette focalisation acoustique. En appliquant des méthodes de codage d'excitations, l'extraction de la nonlinéarité est effectuée sur le signal vibratoire mesuré par interférométrie laser. Des simulations numériques de type pseudo-spectrales préservant la description temporelle valident les concepts associés à ces techniques de localisation. Deux dispositifs expérimentaux de spectroscopie non linéaire élastique (NEWS) basés sur l'interaction paramétrique d'ondes acoustiques ont été réalisés afin de caractériser la nonlinéarité de milieux solides et liquides. Ces dispositifs permettent des caractérisations dites globales et locales des propriétés non linéaires des milieux. L'expérimentation globale présente l'avantage d'être associée à une métrologie fine, basée sur un principe d'auto-réciprocité et permet un étalonnage du paramètre non linéaire. L'objectif en terme d'imagerie de localisation de la nonlinéarité a nécessité la mise en IJuvre d'une extension de cette méthode par l'adjonction d'un processus de retournement temporel (TR) permettant la focalisation ultrasonore des ondes, et la création d'expérimentations innovantes NEWS-TR et TR-NEWS.

**Abstract** This dissertation concerns the Research conducted at Tours University in the field of Nonlinear Acoustics for Nondestructive Testing (NDT) of damaged materials applied to the aeronautic industry, and conveys the potential of advanced signal processing for complex systems. The theoretical multiscale modeling of damaged materials is based on the phenomenological nonlinear non-classical or anomalous PM space approach which was 3D extended using the Kelvin formalism. Symmetry Analysis based on Lie group theory was applied on Burgers, KZ and hysteretic equations, and the bases of a systemic approach were developed with the objective to exploit absolute invariants for optimization of the coded excitations, such as pulse-inversion or chirp-coded process. Invariance with respect to Time Reversal (TR) and reciprocity initiated combined experimental TR-NEWS methods which supplement and improve classical Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) experiments based on parametric interactions of ultrasonic waves.

## Mots clés - Keywords

Instrumentation Ultrasonore - Contrôle non Destructif - Acoustique Non Linéaire - TR-NEWS - Traitement du Signal - Système Non Linéaires - Analyse des Symétries

Nonlinear Acoustics - Instrumentation - Non Destructive Testing - TR-NEWS - Signal Processing - Nonlinear Systems - Lie Symmetries